

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Diseño y modelamiento de relé de corriente diferencial

Alfredo Ricci

a.ricci@uniandes.edu.do

Juan Sebastian Sosa

js.sosa10@uniandes.edu.do

Andrés Felipe Zambrano

af.zambrano@uniandes.edu.do

Cristian Camilo Mariño

cc.marino479@uniandes.edu.do

Índice

Resumen ejecutivo	4
Módulo de procesamiento digital de señales.	5
Lógica del Relé	8
Generación de archivos COMTRADE mediante ATP	10
Generación de archivos sin transformadores de voltajes y corrientes	11
Generación de archivos usando transformadores de voltajes y corrientes	13
Pruebas de la herramienta en diferentes escenarios.	18
Obtención de datos sin VT ni CT	18
Falla línea a línea	18
Falla en la línea A sólidamente aterrizada	20
Falla trifásica sólidamente aterrizada	21
Caso de Estudio	22
Medición mediante transformadores de corriente y voltaje	25
Falla en la linea A sólidamente aterrizada Interna	25
Falla trifásica sólidamente aterrizada Interna	26
Falla trifásica sólidamente aterrizada Externa	27
Falla Linea-Linea Externa Aterrizada con Alta Impedancia	28
Referencias	30
ANEXOS	32

Índice de figuras

1. Resumen resultados caso de estudio.	5
2. digramas fasoriales caso de estudio.	5
3. Pasos para realizar un submuestreo. Primero se realiza una interpolación, seguida de un submuestreo. Se realiza el ejemplo con una señal sinusoidal.	6
4. Diagrama de bloques de Simulink para el DSP	7
5. Señal filtrada con tres valores de ω_n , de 120Hz, 70Hz y 400 Hz respectivamente	8
6. Mediciones Relé Diferencial. Tomado de [1].	9
7. Plano Alfa. Tomado de [1].	9
8. Lógica del Relé Diferencial.	10
9. Sistema eléctrico diseñado para las pruebas.	11
10. Modulo en ATP para la simulación de fallas.	11
11. Tensiones en el sistema falla monofásica.	12
12. Corrientes en el sistema falla monofásica.	12
13. Tensiones en el sistema falla trifásica.	12
14. Corrientes en el sistema falla trifásica.	13
15. Tensiones en el sistema falla linea-linea.	13
16. Corrientes en el sistema falla linea-linea.	13
17. Modelo sistema interconectado	14
18. Modelo transformador de corriente para una sola fase	14
19. Modelo transformador de voltaje para una sola fase	15
20. Modulo de toma de valores de tensión y corriente	15
21. Tensiones falla monofásica interna.	16
22. Corrientes falla monofásica interna.	16
23. Tensiones falla trifásica interna.	17
24. Corrientes falla trifásica interna.	17
25. Activación de relés en falla línea a línea entre fases A y B.	19
26. Criterio de activación de relé, en el plano complejo, en falla línea a línea.	19
27. Activación de relés en falla de línea A sólidamente aterrizada	20
28. Criterio de activación de relé, en el plano complejo, en falla línea A sólidamente aterrizada.	21
29. Activación de relés en falla trifásica sólidamente aterrizada.	22
30. Criterio de activación de relé, en el plano complejo, en falla trifásica sólidamente aterrizada.	22
31. Resultados caso de estudio para la fase A.	23
32. Resultados caso de estudio para la fase B.	24
33. Resultados caso de estudio para la fase C.	24
34. Resumen resultados caso de estudio.	25
35. Diagramas fasoriales caso de estudio.	25
36. Resumen falla monofásica interna.	26
37. Diagramas fasoriales falla monofásica interna.	26

38. Resumen falla trifásica interna.	27
39. Diagramas fasoriales falla trifásica interna.	27
40. Resumen falla trifásica Externa.	28
41. Diagramas fasoriales falla trifásica Externa.	28
42. Resumen falla linea linea externa.	29
43. Diagramas fasoriales falla linea linea externa.	29
44. Diagramas fasoriales de falla monofásica interna con un delay de 2 milisegundos.	30
45. Diagramas fasoriales falla monofásica interna sin delay.	30
46. Fase A falla monofásica.	32
47. Fase B falla monofásica.	32
48. Fase C falla monofásica.	33
49. Fase A falla linea linea interna.	33
50. Fase B falla linea linea interna.	34
51. Fase C falla linea linea interna.	34
52. Fase A trifásica interna sin CT.	35
53. Fase B trifásica interna sin CT.	35
54. Fase C trifásica interna sin CT.	36
55. Voltajes falla trifásica interna.	36
56. Fase 1 trifásica interna.	37
57. Fase 2 trifásica interna.	37
58. Fase 3 trifásica interna.	38
59. Voltajes falla trifásica externa.	38
60. Fase 1 trifásica externa.	39
61. Fase 2 trifásica externa.	39
62. Fase 3 trifásica externa.	40
63. Voltajes falla monofásica interna.	40
64. Fase 1 monofásica interna.	41
65. Fase 2 monofásica interna.	41
66. Fase 3 monofásica interna.	42
67. Voltajes falla Línea-Línea Externa.	42
68. Fase 1 linea linea externa.	43
69. Fase 2 linea linea externa.	43
70. Fase 2 linea linea externa.	44

Resumen ejecutivo

En el presente documento, se muestra el procedimiento realizado para modelar la activación de un relé diferencial a partir de archivos **COMTRADE** que contengan doce señales correspondientes a los voltajes y corrientes de las fases A, B y C en los dos puntos de medición. Para esto, inicialmente se describe el módulo de procesamiento digital de señales. En este módulo, se utiliza un script lector de formato **COMTRADE**, basado en [3], que permite importar todas las señales en arreglos que posteriormente pueden ser manipulados para modelar el relé. Este script fue diseñado para que el usuario pueda ingresar la tasa de muestreo a la cual fue generado o medido el **COMTRADE**, después realice una interpolación de los datos y finalmente submuestree a 4800 muestras por segundo.

Tras haber obtenido los datos con la frecuencia de muestreo deseada, estos son importados a **Simulink**, donde se utiliza un filtro pasabajos de segundo orden con frecuencia de corte igual a 120Hz para evitar el ruido computacional generado en los transitorios de las señales. Finalmente, se realiza una transformada de Fourier a las señales filtradas, para obtener la magnitud y fase de las señales de voltaje y corriente, necesarias para aplicar la lógica del relé diferencial.

El relé de corriente diferencial se basa en la relación de corrientes, medidas entre dos terminales de una misma línea y en sentido contrario, las cuales deben ser iguales en magnitud y desfasadas 180° . Sin embargo, en condiciones de falla, esta relación cambia, por lo cual saldrá de su zona de operación normal y el relé estará obligado a dispararse. En este caso, se utilizó el plano alfa limitado por una relación de magnitudes de 1 a 6 y un intervalo de operación entre $82,5^\circ$ y $277,5^\circ$. Por este motivo, se realiza una división de magnitudes y resta de ángulos para determinar la relación entre las corrientes de cada fase y compararlas con las restricciones descritas, de tal manera que, al incumplirse cualquiera de ellas, se active el relé. Adicionalmente, se tienen en cuenta condiciones especiales, como las etapas previas a la transmisión de potencia, donde las magnitudes y fases de las corrientes son nulas, para negar la activación del relé, a pesar de que las mediciones generen resultados fuera de la región de operación normal.

El algoritmo descrito, se pone a prueba inicialmente con tres fallas generadas en **ATPDraw**, correspondientes a los escenarios de falla línea a línea, falla monofásica sólidamente aterrizada y falla trifásica sólidamente aterrizada, en los cuales se puede observar la correcta activación de los relés en cada una de las fases falladas. Posteriormente, se analiza un caso de estudio en el cual se detallan los resultados obtenidos en cada una de los módulos descritos previamente, observando el correcto funcionamiento del algoritmo desde la lectura de las señales hasta la activación de los relés correspondientes. El resumen de este caso de estudio se muestra en la figura 1 donde se puede apreciar una falla de la fase B a tierra con una duración de 47 ms y la correspondiente activación del relé de la fase B en el intervalo de duración de la falla, mientras los otros relés permanecen sin activarse.

Finalmente, se prueba el relé en una situación más acorde a la realidad, en un sistema con más de una línea donde las mediciones se realizan mediante transformadores de voltaje VT y corriente CT. En este caso, además de verificar la correcta activación de los relés en fallas internas, también se comprueba que el sistema de protecciones sea resistente a fallas externas, es decir, que los relés no se activen ante fallas que están en lugares diferentes a la línea protegida.

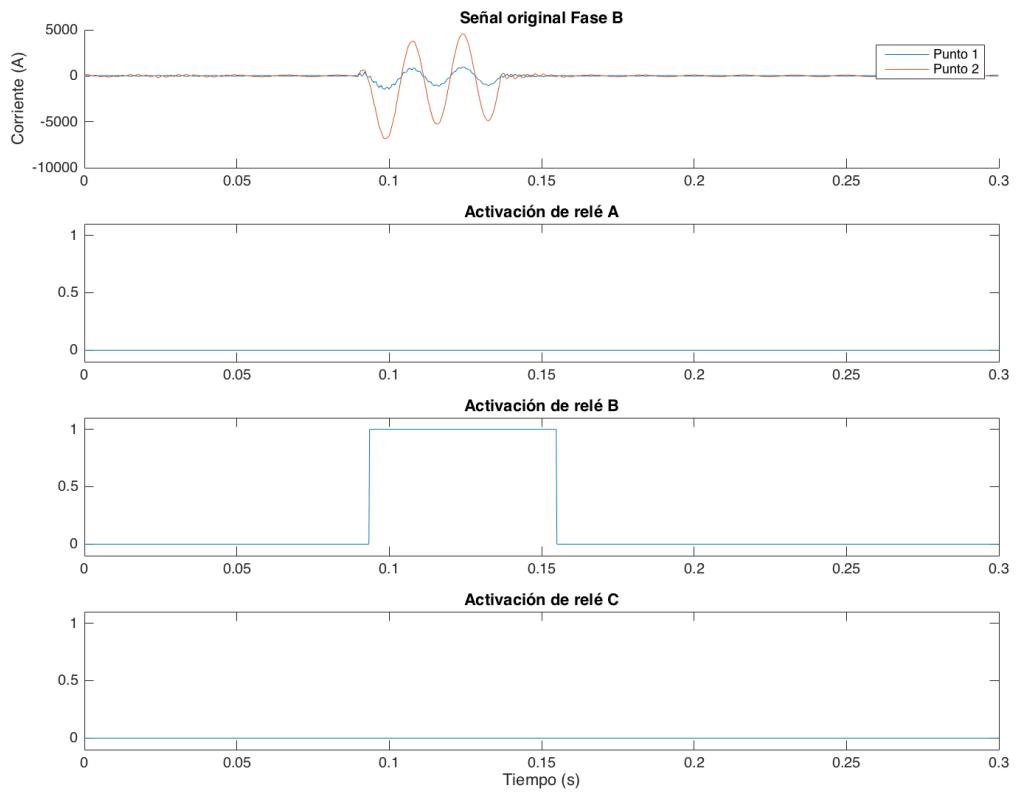


Figura 1: Resumen resultados caso de estudio.

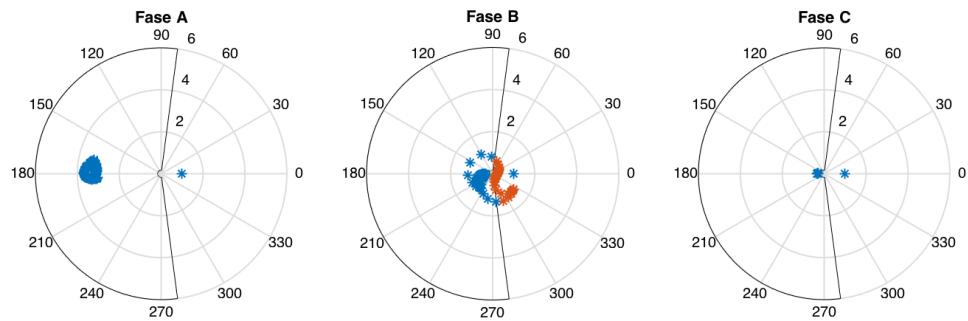


Figura 2: Diagramas fasoriales caso de estudio.

Módulo de procesamiento digital de señales.

El primer módulo de la entrega consiste en realizar el procesamiento digital de las señales. Este debe ser capaz de leer un archivo **COMTRADE**, y la salida debe ser un vector que contenga la magnitud y fase de alguna de las señales de voltaje o corriente del archivo como función del tiempo. Para esto, se debe empezar por tener un script que lea el archivo **COMTRADE**, y almacene en variables de **MATLAB** las señales de voltaje y corriente de este. Se usó un lector estándar de archivos **COMTRADE** de **MATLAB**. [3]

Siguiendo, se debe realizar un sub muestreo de las señales obtenidas. Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos la frecuencia de muestreo original no es múltiplo de la frecuencia de muestreo deseada, se realiza el sub muestreo en tres pasos.

- Primero se encuentra el máximo común divisor entre la tasa de muestreo original, y la tasa de muestreo deseada. Usando la función `gcd(x,y)` de **MATLAB** se logra esto.
- Posteriormente se realiza una interpolación de los datos. La cantidad de datos que se deben agregar es igual a la división entre la tasa de muestreo deseada y el máximo común divisor entre las frecuencias, por cada dato. Se realiza este proceso en **MATLAB** mediante la función `interp1`.
- Finalmente se reducen la cantidad de muestras de modo que solo queda 1 de cada n muestras, donde n es la razón entre la tasa de muestreo original, y el máximo común divisor entre las dos frecuencias. Se usa la función `downsample` de **MATLAB** para este proceso.

En la figura 3 se observa la secuencia necesaria para realizar un submuestreo de 3:2. La primera imagen es la señal original, seguida de una señal interpolada al doble, y finalmente se realiza un submuestreo de 3 a 1.

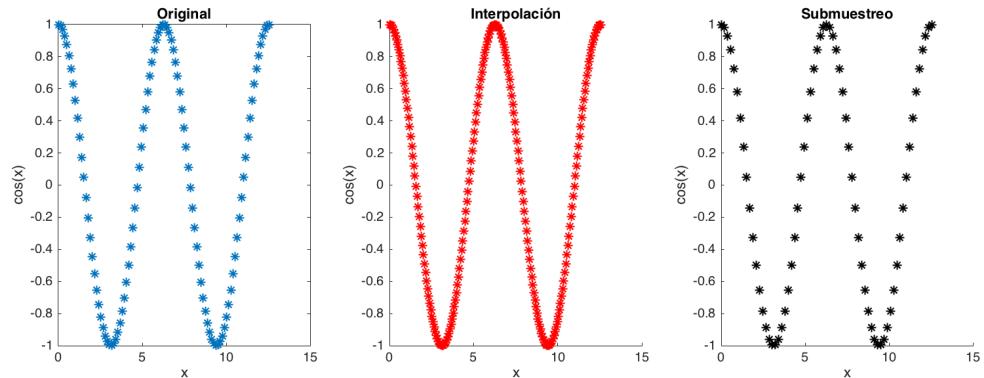


Figura 3: Pasos para realizar un submuestreo. Primero se realiza una interpolación, seguida de un submuestreo. Se realiza el ejemplo con una señal sinusoidal.

Siguiendo, se usa la una secuencia de bloques de **Simulink** para terminar de procesar la señal. La figura 4 muestra el diagrama de **Simulink** usado.

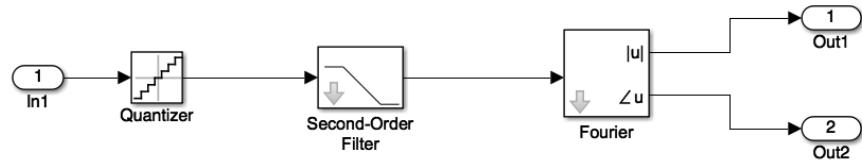


Figura 4: Diagrama de bloques de Simulink para el DSP

Como se observa, el procesamiento consta de tres etapas. La primera etapa consiste en el módulo **quantizer**, el cual toma una señal análoga y la convierte en una señal digital. Esto significa que durante los intervalos de tiempo entre dos muestras, se asignará un valor constante igual al valor de la primera muestra del intervalo.

La segunda etapa consiste en el filtrado de la señal. Este se realiza mediante un filtro pasabajos de segundo orden. La función de transferencia de este filtro está dada por:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (1)$$

De este modo se deben elegir los valores ideales de los parámetros ζ y ω_n . ω_n es la frecuencia de corte del filtro. De este modo, este parámetro debe ser suficientemente alto como para no afectar la señal original en la frecuencia de oscilación de esta (60Hz), pero suficientemente bajo como para no dejar pasar las señales de ruido. Se encontró mediante el método de sintonización empírica que los valores que filtraban de mejor forma sin afectar la frecuencia de operación eran de $\zeta = 0,707$ y $\omega_n = 120\text{Hz}$. En la figura 5 se observa el comportamiento de la señal filtrada usando un ω_n de 120Hz , 400Hz y 70Hz respectivamente. Se observa que al usar una frecuencia alta, la señal queda prácticamente igual. Por el contrario, al usar una frecuencia cercana a la frecuencia de operación, el ruido se filtra, pero la magnitud de la señal a 60Hz cambia. Así, un punto intermedio de 120Hz funciona bastante bien para eliminar el ruido numérico.

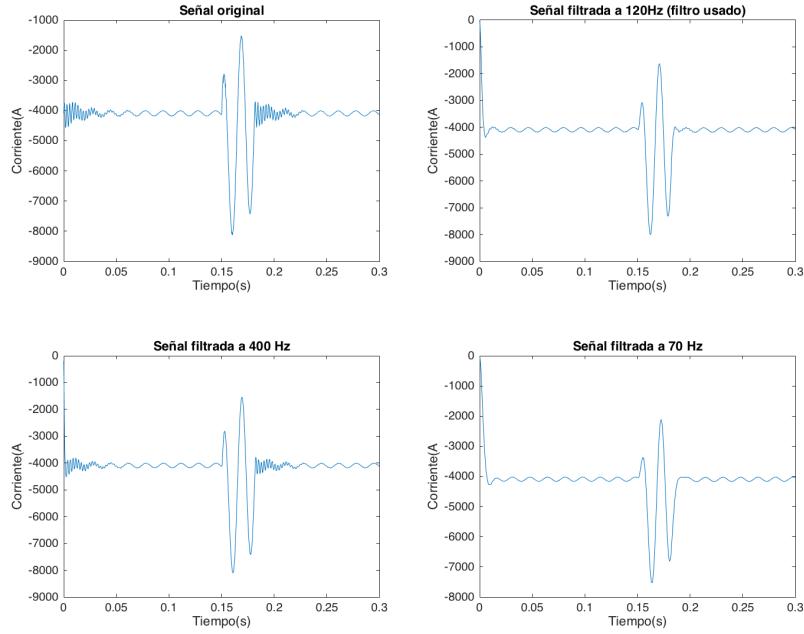


Figura 5: Señal filtrada con tres valores de ω_n , de 120Hz, 70Hz y 400 Hz respectivamente

Finalmente se utiliza el módulo **Fourier** de **Simulink**, el cual tiene como entrada una señal digital, y su salida es la magnitud y fase de esta señal como función del tiempo. Se logra esto mediante una ventana que se desplaza, y en cada uno de sus desplazamientos realiza una *transformada de Fourier*. Mediante los parámetros *fundamental frequency (Hz)* y *Harmonic* del módulo se selecciona la frecuencia de 60 Hz, y se obtienen la magnitud y fase de la señal en un instante de tiempo para la frecuencia deseada. Estos valores son los que se usan posteriormente en la lógica del relé.

Lógica del Relé

La lógica de un relé diferencial, se basa en la comparación de dos o más señales de corriente en cada una de las barras que están conectadas por una misma línea de transmisión. En sistemas donde se presenten bifurcaciones, que requieran más de dos mediciones, es necesario establecer un equivalente de éstas para reducirlas a solamente dos señales de corriente, siguiendo el algoritmo presentado en [2]. En este caso, este proceso no es necesario debido a que se utiliza una línea de transmisión simple con dos terminales.

Después de tener un sistema con únicamente dos mediciones, es necesario establecer la relación entre estas, tanto en magnitud como en fase, la cual en estado de operación normal debe ser de $1\angle 180^\circ$, de acuerdo a lo mostrado en la figura 6. Estas relaciones permiten conocer qué tan alejado está el funcionamiento actual de la línea a comparación del estado normal y de esta manera determinar si es necesario realizar un disparo del relé.

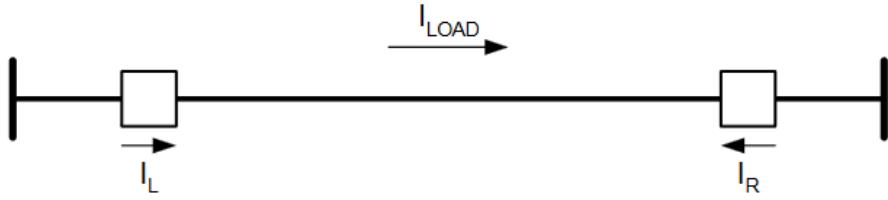


Figura 6: Mediciones Relé Diferencial. Tomado de [1].

Existen diversos mecanismos para determinar las restricciones, tanto de ángulo como de fase, en las cuales se considera que la línea está operando con normalidad. En este caso, se utiliza una relación de magnitudes máxima de 1 a 6 y un intervalo de fase entre $82,5^\circ$ y $277,5^\circ$ abarcando un ángulo total de 195° de acuerdo a lo recomendado por [1]. A esta definición de las restricciones se le conoce como plano alfa y se muestra en la figura 7.

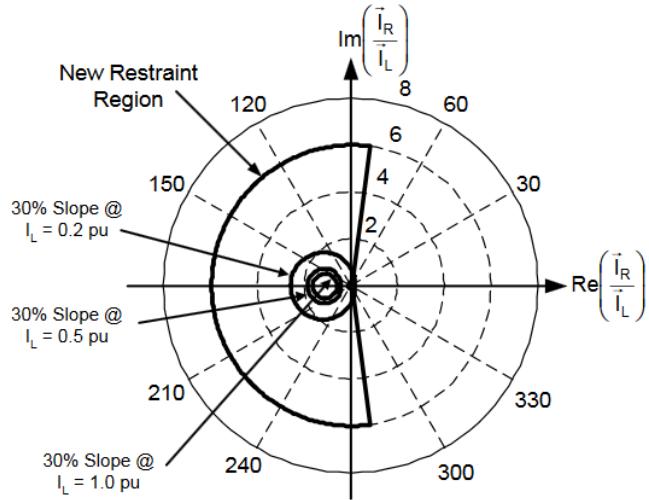


Figura 7: Plano Alfa. Tomado de [1].

Después de determinar las restricciones que activan el relé y haber obtenido la magnitud y fase de las señales de corriente provenientes del archivo **COMTRADE**, se realiza la programación de la lógica del relé como se muestra en la figura 8. Las entradas de este bloque, son la magnitud y el ángulo de las dos señales de corriente correspondientes a una misma fase, en este caso, la fase A. Inicialmente, se realiza la división de las magnitudes y se compara el resultado con la restricción mencionada para éstas, es decir, la relación de 1 a 6. En caso de que dicha relación se supere, el resultado será un 1 lógico que ingresará a las compuertas lógicas siguientes y activará el relé. También, se realiza la resta de las fases para determinar la fase resultante de la división de las corrientes y se compara con los ángulos definidos para la restricción de activación del relé, es decir, $82,5^\circ$ y $277,5^\circ$. Adicionalmente, en la comparación de las fases, se coloca un valor absoluto a la salida de la resta para evitar activaciones causadas por un resultado negativo que en el intervalo de 0° a 360° representa un ángulo que no

debe activar el relé. Es necesario mencionar, que la aplicación del valor absoluto sólo es posible por la simetría del plano alfa, en caso de que éste no fuera simétrico, era necesario utilizar un algoritmo más complejo para determinar si estos ángulos negativos deberían o no activar el relé.

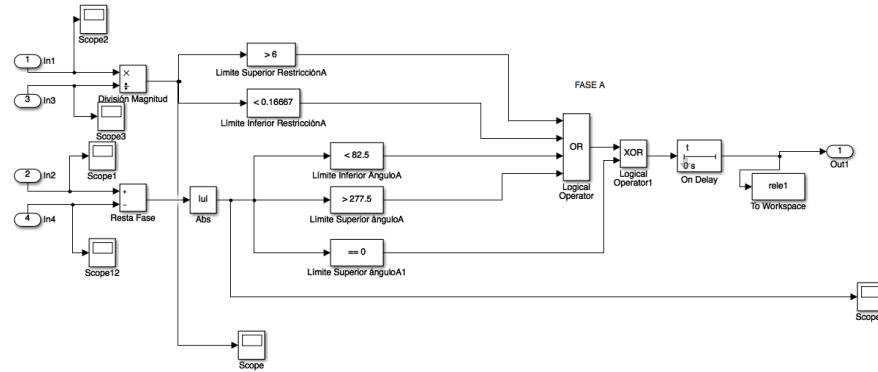


Figura 8: Lógica del Relé Diferencial.

Las comparaciones descritas previamente, ingresan a una compuerta OR que permite la activación del relé cada vez que alguna de estas cuatro señales sea un 1 lógico. Además, se coloca un comparador adicional, el cual permite conocer si el sistema está en una fase previa a la transmisión de potencia, donde todas las fases son iguales a 0. Para esto, se agrega a la salida una compuerta XOR que evite la activación del relé en caso de que ésta haya sido causada por una falta de transferencia de potencia y permita la activación en las demás ocasiones. Finalmente, se agrega un bloque *To Workspace* que permita exportar los datos a **MATLAB** para un posterior análisis o una mejor observación de los mismos. En caso de que las señales se estén midiendo en el mismo sentido, es decir, que la corriente I_r esté en el sentido contrario al mostrado en la figura 6, se adiciona 180° a la resta de ángulos de la figura 8. Por este motivo, es de vital importancia determinar la manera en que se está midiendo la señal de corriente antes de aplicar el algoritmo de activación del relé. Finalmente se adiciona un delay al encendido, mediante la función *On Delay* de simulink. Este agrega un retraso a una señal lógica cuando ésta pasa de ser 0 a ser 1, siempre y cuando la señal se mantenga en 1. Cuando ésta pasa de 1 a 0, no hay cambios.

Generación de archivos COMTRADE mediante ATP

Con el objetivo de probar el diseño realizado fue necesario generar múltiples archivos **COMTRADE**, que representaran el comportamiento de un sistema sencillo en distintos escenarios de falla. Para lograr esto se fue necesario utilizar el software **ATP**, en este se diseño el sistema que se muestra en la figura 9. Este sistema cuenta con un modulo de fallas que se presenta en la figura 10 mediante el cual se pueden simular fallas trifásicas, monofásicas y linea.linea

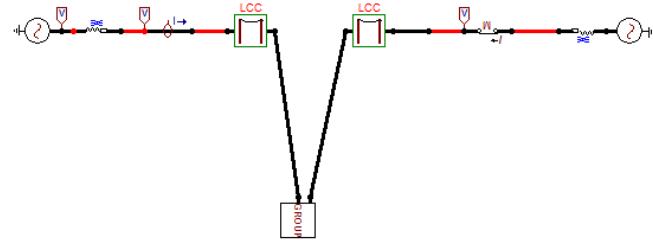


Figura 9: Sistema eléctrico diseñado para las pruebas.

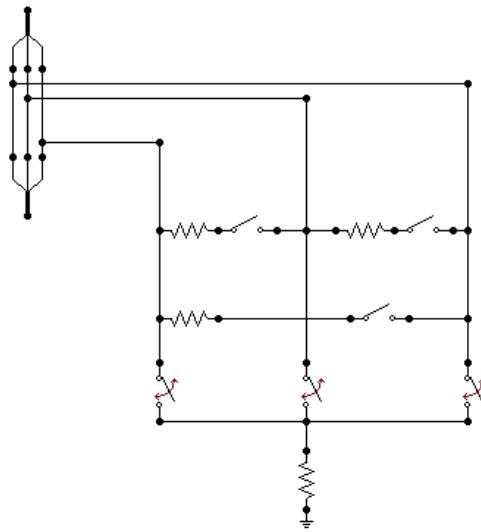


Figura 10: Módulo en **ATP** para la simulación de fallas.

utilizando este modelo en **ATP** se obtuvieron los siguientes para los tres tipos de fallas

Generación de archivos sin transformadores de voltajes y corrientes

Falla monofásica

En las figuras 11 y 12 se exponen las señales de tensión y corriente en el sistema cuando se presenta una falla monofásica con una duración de 30 ms.

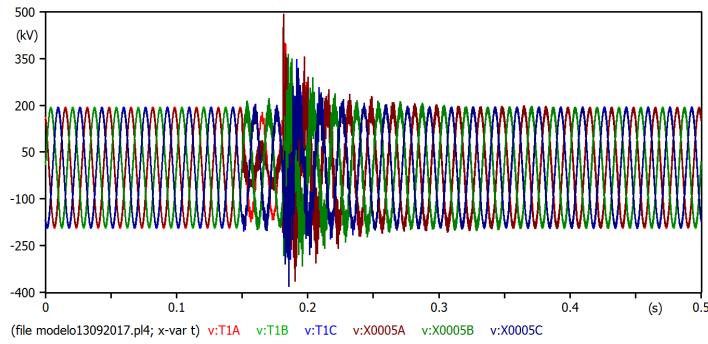


Figura 11: Tensiones en el sistema falla monofásica.

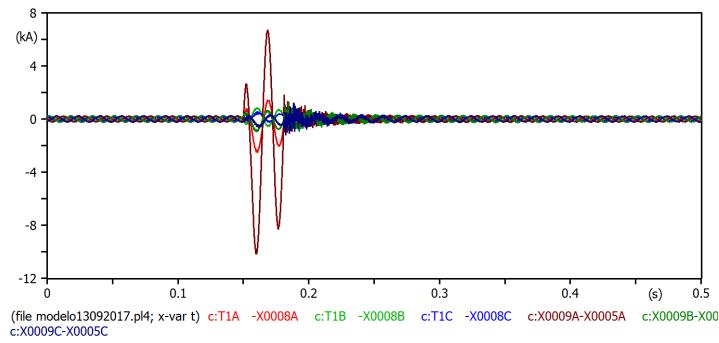


Figura 12: Corrientes en el sistema falla monofásica.

Falla trifásica

En las figuras 13 y 14 se exponen las señales de tensión y corriente en el sistema cuando se presenta una falla trifásica con una duración de 30 ms.

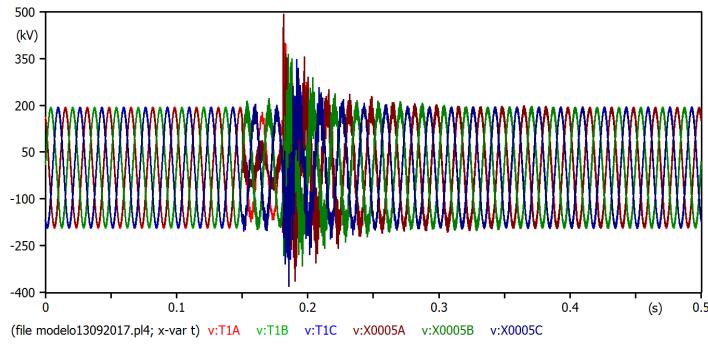


Figura 13: Tensiones en el sistema falla trifásica.

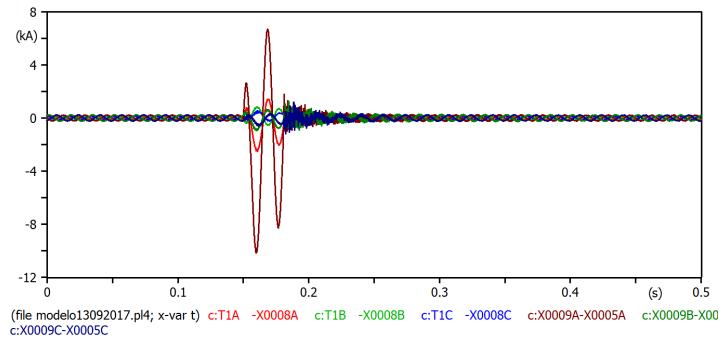


Figura 14: Corrientes en el sistema falla trifásica.

Falla linea linea

En las figuras 15 y 16 se exponen las señales de tensión y corriente en el sistema cuando se presenta una falla linea-linea con una duración de 30 ms.

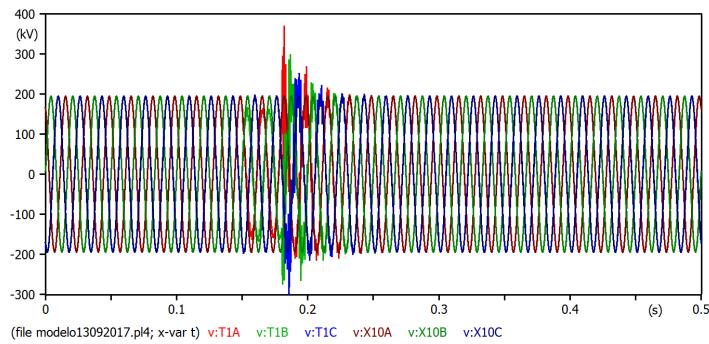


Figura 15: Tensiones en el sistema falla linea-linea.

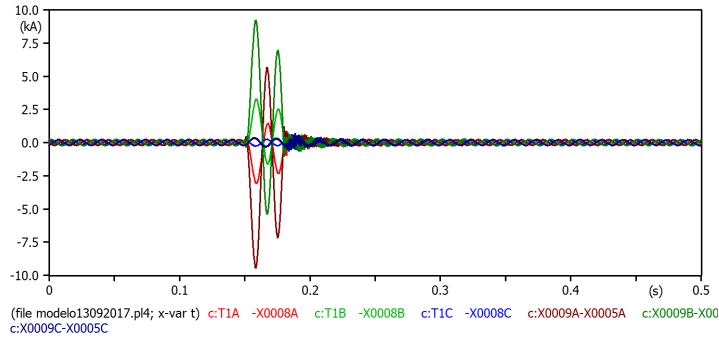


Figura 16: Corrientes en el sistema falla linea-linea.

Generación de archivos usando transformadores de voltajes y corrientes

Para probar el diseño realizado con generadores de voltaje y corriente fue necesario generar múltiples archivos **COMTRADE** a partir de un caso de estudio base, de un sistema interconectado. Nos seguimos apoyando en el software **ATP**, utilizamos el diseño que se puede observar en la figura 17 . Este sistema cuenta con un modulo de fallas ya visto que se presenta en la figura 10 mediante el cual se pueden simular fallas trifásicas, monofásicas y linea.linea. Además de esto se utiliza los siguiente módulos de transformadores de corrientes y voltajes que observan en la figura . El transformador de corriente **CT** tiene las siguientes características mostradas en la figura 18 y el transformador de voltaje **VT** las siguientes características mostradas en la figura 19.

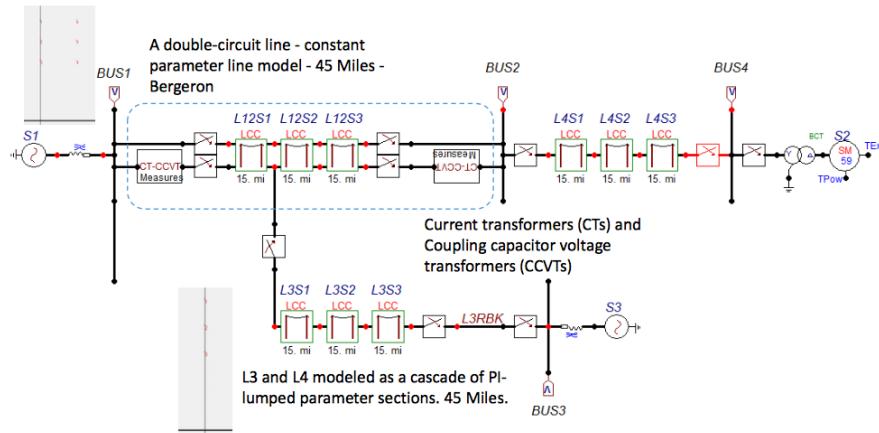
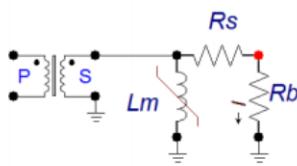


Figura 17: Modelo sistema interconectado



DATA	UNIT	VALUE
Resistance in magnetizing branch Rmag	ohm	100000
Resistance in primary winding Rp	ohm	1E-5
Inductance in primary winding Ip	mH	1E-5
Rated voltage in primary winding Vrp	kV	5
Resistance in secondary winding Rs	ohm	1E-5
Inductance in secondary winding	mH	1E-5
Rated voltage in secondary winding	kV	2000
Nonlinear characteristic flag RMS	0 or 1	0

Table 4.7: Parameters of the saturable transformer

CURRENT I (Amp)	FLUXLINKED (Wb T)
0.0198	0.2851
0.0281	0.604
0.0438	1.1141
0.0565	1.5343
0.0694	1.8607
0.1025	2.2771
0.2167	2.6522
0.7002	3.0234
1.0631	3.1098
15.903	3.2261

Table 4.8: Parameters of the magnetization curve

Figura 18: Modelo transformador de corriente para una sola fase

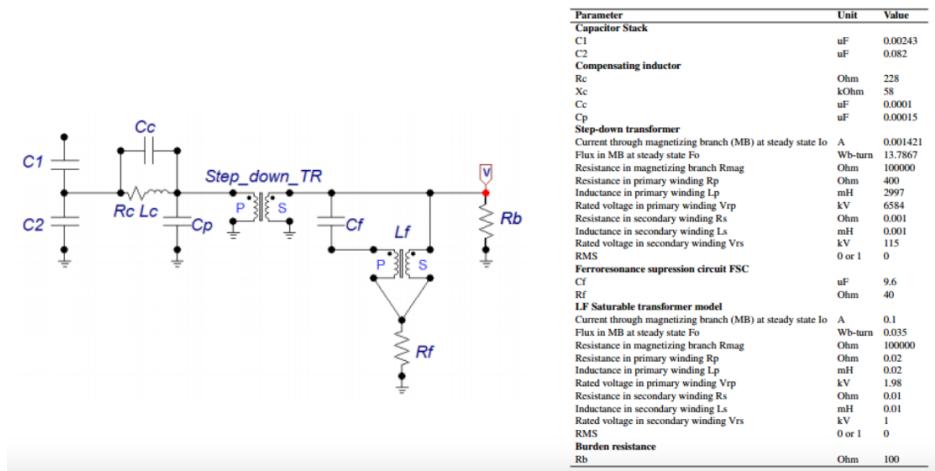


Figura 19: Modelo transformador de voltaje para una sola fase

Para tomar los datos de las tres fases que seria lo deseado, tenemos que tomar en cuenta que los dos modelos son para una fase. Por lo que unimos todo con la ayuda de la herramienta Spliter de **ATP**. Esto lo podemos ver en la figura 20 que seria el modulo de medición de valores de corriente y voltaje.

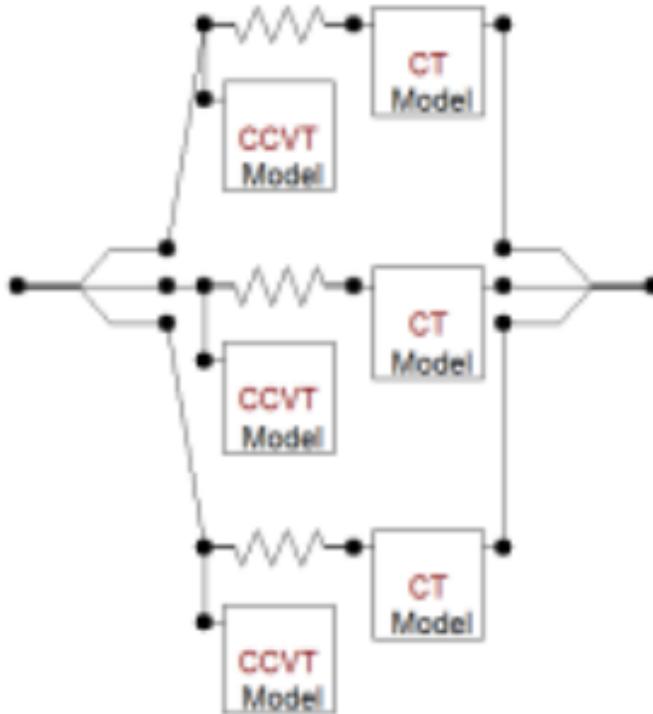


Figura 20: Modulo de toma de valores de tensión y corriente

Los siguientes valores en las fallas están referidos al lado secundario del transformador.

Falla monofásica

se exponen las señales de tensión y corriente en el sistema cuando se presenta una falla monofásica con una duración de 10 ms.

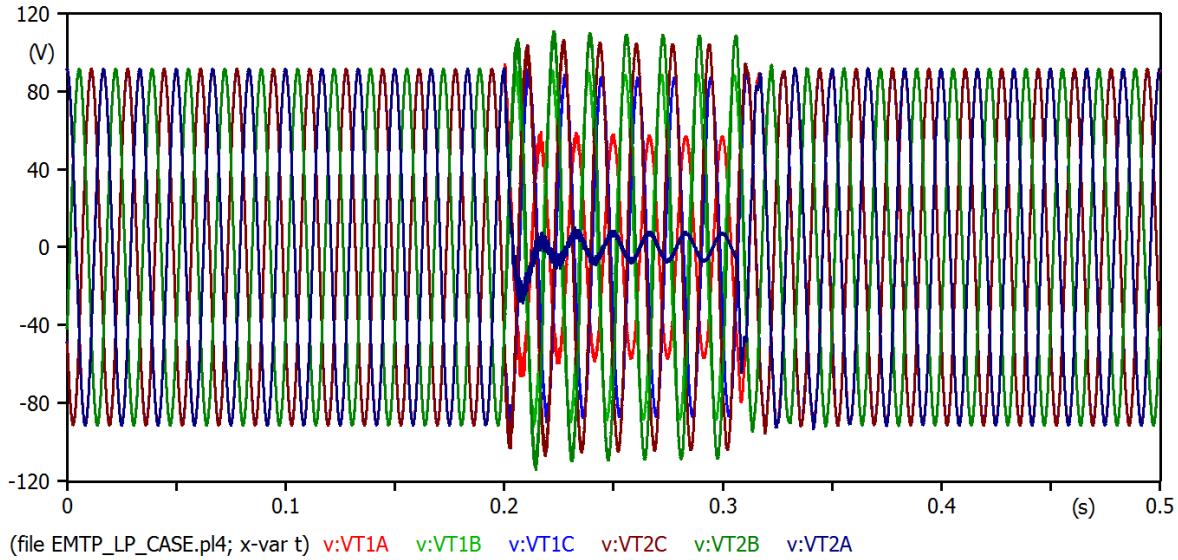


Figura 21: Tensiones falla monofásica interna.

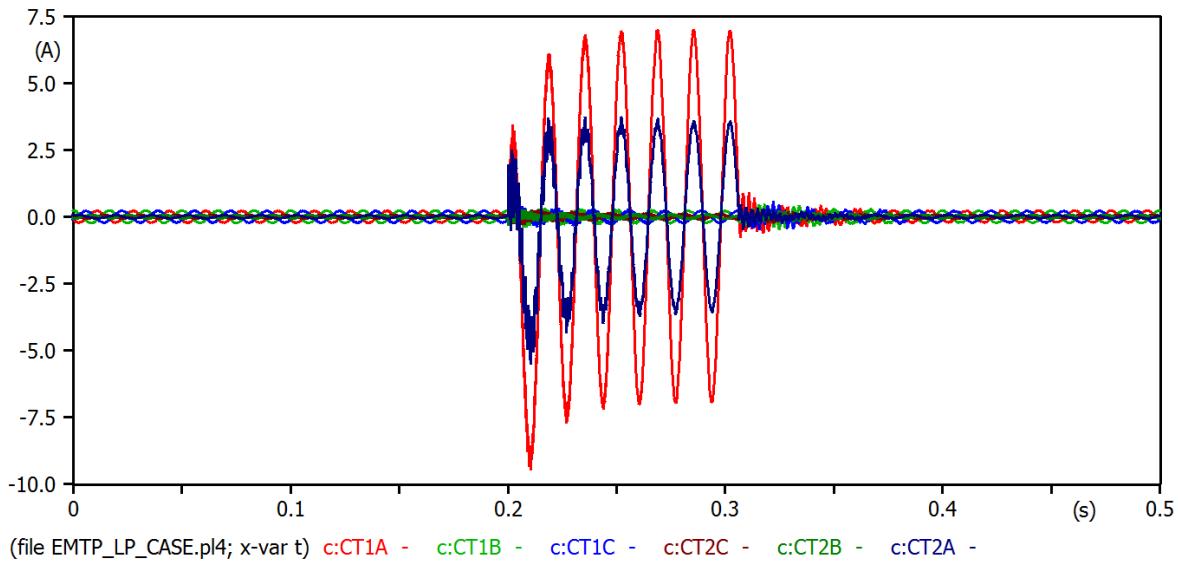


Figura 22: Corrientes falla monofásica interna.

Falla trifásica

se exponen las señales de tensión y corriente en el sistema cuando se presenta una falla trifásica con una duración de 10 ms.

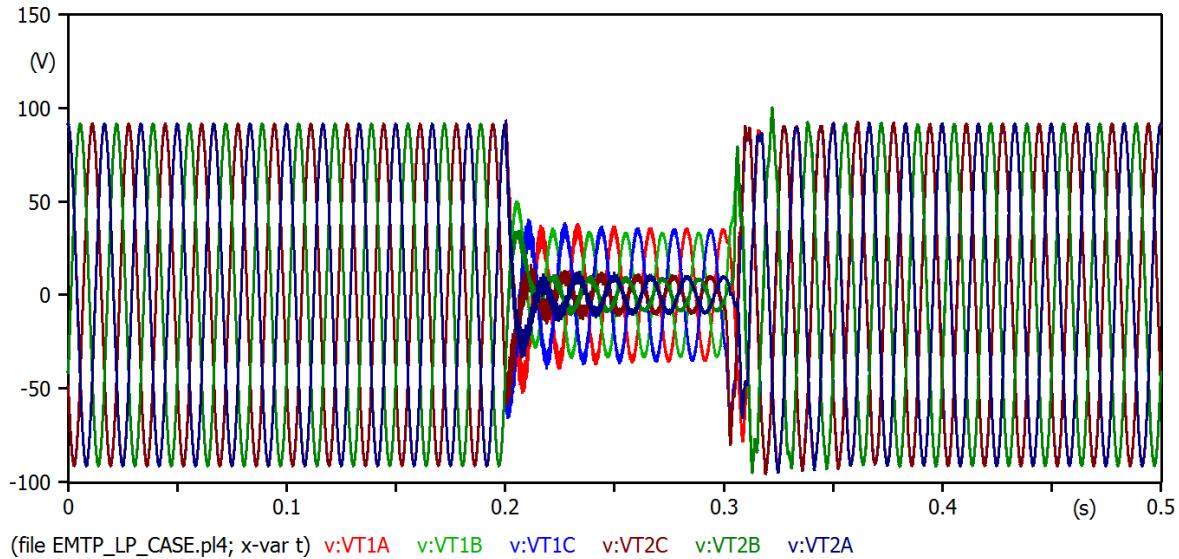


Figura 23: Tensiones falla trifásica interna.

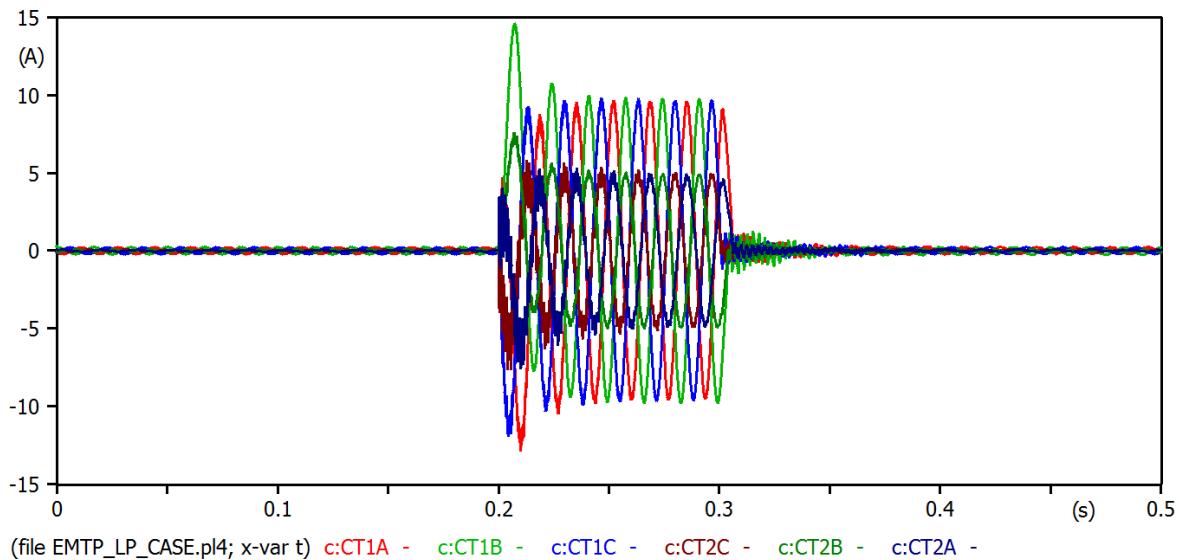


Figura 24: Corrientes falla trifásica interna.

Falla linea linea

se exponen las señales de tensión y corriente en el sistema cuando se presenta una falla linea-linea con una duración de 10 ms.

Pruebas de la herramienta en diferentes escenarios.

Para comprobar que la herramienta funciona correctamente se realizan pruebas de esta en cuatro escenarios diferentes. Los primeros tres escenarios, son los mencionados en la sección dedicada a generación de archivos **COMTRADE**, es decir, falla línea-línea, falla monofásica a tierra y falla trifásica a tierra. Las dos fallas a tierra son sólidamente aterrizzadas. El cuarto escenario, corresponde al archivo de **COMTRADE** dado por el profesor. Se hará referencia a este escenario como *caso de estudio*. Los resultados de los cuatro escenarios se muestran y analizan a continuación.

Obtención de datos sin VT ni CT

Falla línea a línea

El primer escenario a analizar es una falla línea-línea. En este caso la falla es entre la *fase A* y la *fase B*. Los resultados obtenidos al analizar esta falla se muestran en las figuras 25 y 26.

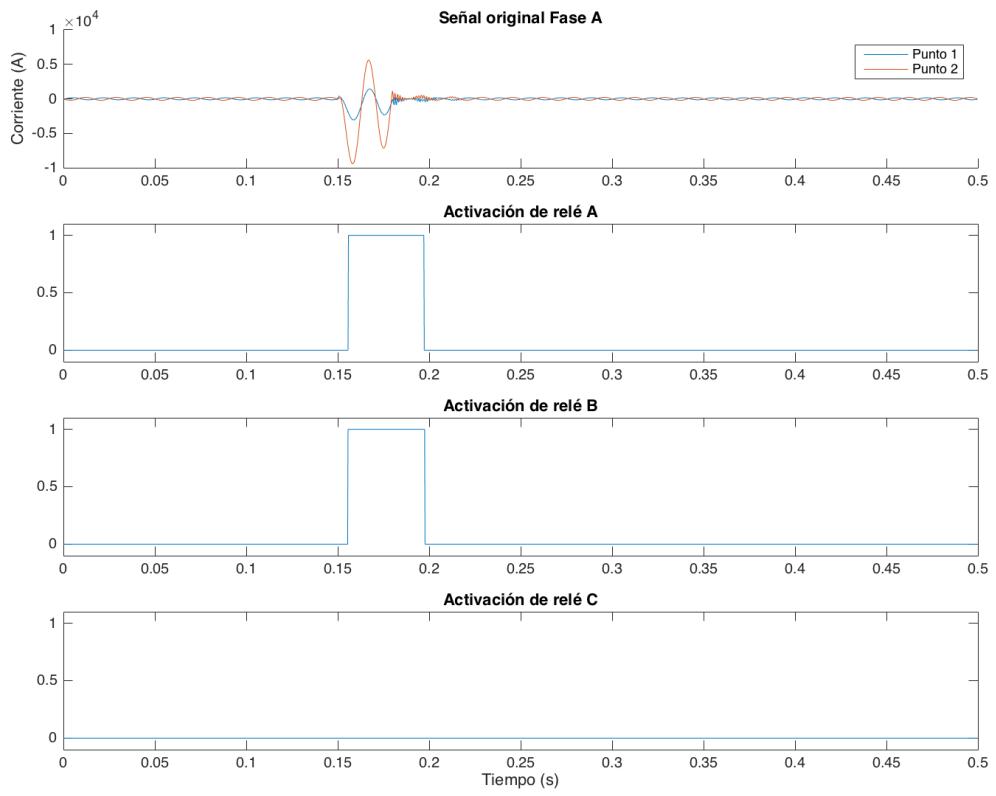


Figura 25: Activación de relés en falla línea a línea entre fases A y B.

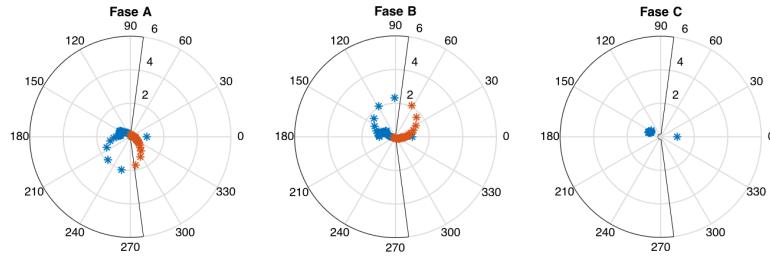


Figura 26: Criterio de activación de relé, en el plano complejo, en falla línea a línea.

Se observa una activación en el relé A y el relé B, un breve instante de tiempo después de la activación de la falla entre las líneas A y B. En el diagrama fasorial, se observa que la fase C, no fallada, se mantiene aproximadamente constante con magnitud de diferencia de corrientes 1, y desfase de 180 grados. Por el contrario, las fases falladas A y B, inician una rotación de 360 grado desde que

se inicia la falla hasta que esta termina. De este, un breve periodo después de que se inicia la falla, el fasor entra en la región de operación del relé (mostrado en rojo), lo que activa la lógica de éste. Se observa que en la fase A el giro es en sentido antihorario, mientras que en la fase B el giro es en sentido horario. Las razones entre las corrientes no es suficiente para activar la falla, pero la diferencia angular sí, debido a que las fases de las corrientes tienden a igualarse. En la sección de apéndices se encuentra un resumen completo de la falla.

Falla en la línea A sólidamente aterrizada

El siguiente escenario es una falla en la *Fase A*, sólidamente aterrizada. Se muestra el resumen de los resultados en las figuras 27 y 28.

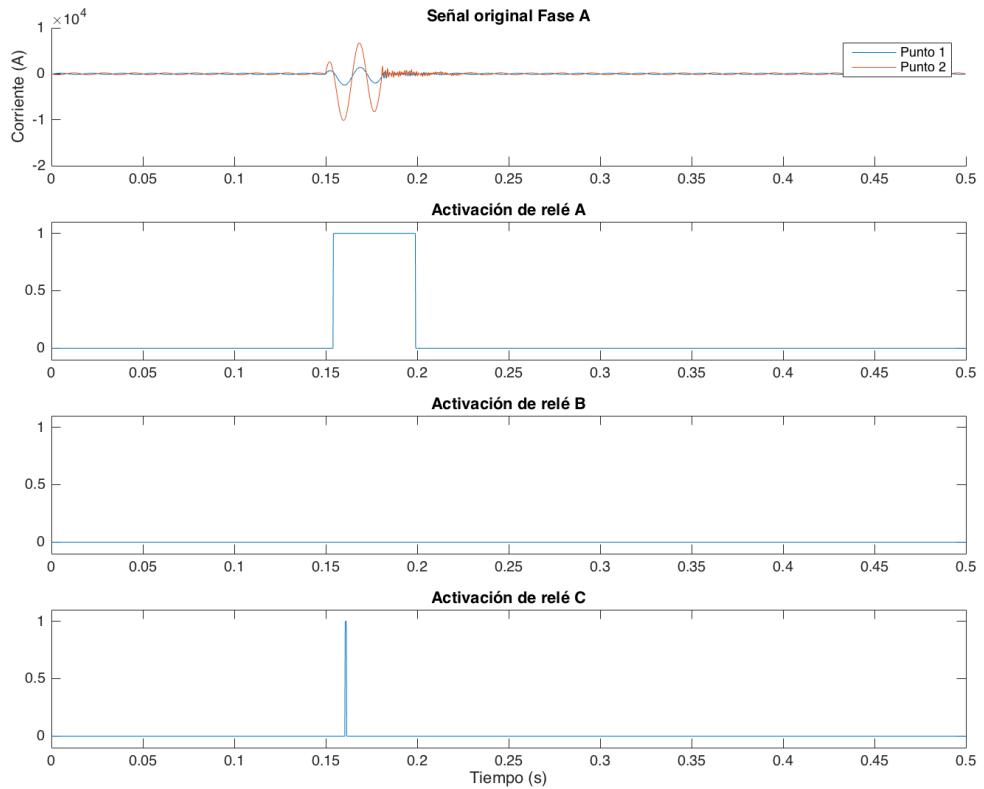


Figura 27: Activación de relés en falla de línea A sólidamente aterrizada

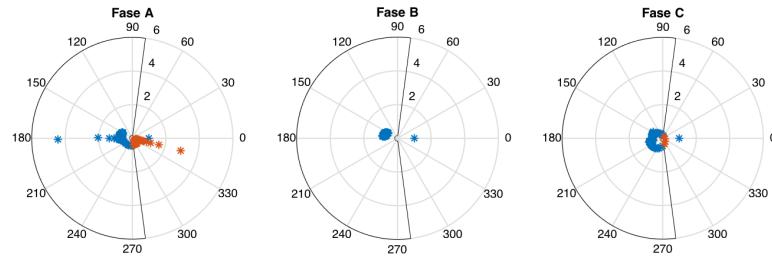


Figura 28: Criterio de activación de relé, en el plano complejo, en falla línea A sólidamente aterrizada.

Al generar una falla en la línea A sólidamente aterrizada, se observa una correcta activación del relé de la misma. Además de esto, es posible notar que el relé de la fase C, se activa durante un breve periodo de tiempo. Esto se debe a que al fallar la línea A, la fase de la línea C, sufre un cambio abrupto (ver apéndice), lo que envía por un instante de tiempo el fasor a la zona de activación por fase. La magnitud se mantiene relativamente estable. En cuanto a la evolución temporal del fasor en A, es posible observar que existe una relación de magnitudes de aproximadamente 3 a 1. Esto se debe a que un la falla no ocurre a la misma distancia de ambos generadores, y al haber más distancia a un lado que el otro, también existe una mayor impedancia. Para que la falla se active por magnitud, esta debe suceder muy cerca de alguno de los generadores. De lo contrario, la falla se dará por una diferencia de fase.

Falla trifásica sólidamente aterrizada

El siguiente escenario es una falla trifásica, sólidamente aterrizada, cuyos resultados se resumen en las figuras 29 y 30.

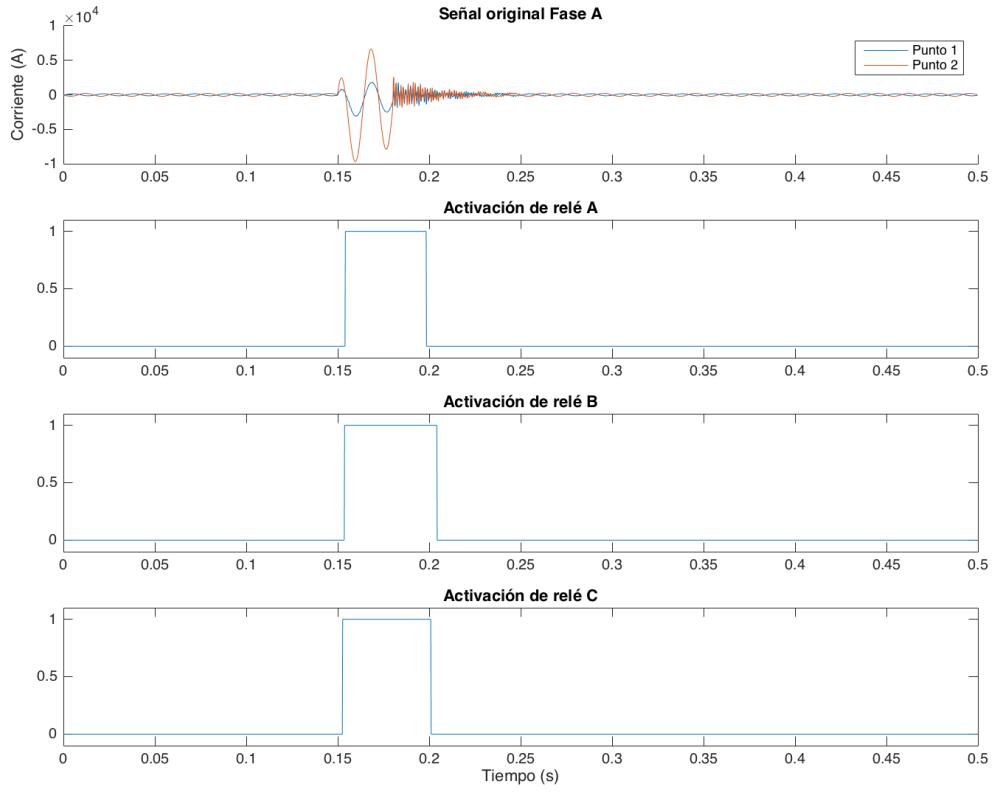


Figura 29: Activación de relés en falla trifásica sólidamente aterrizada.

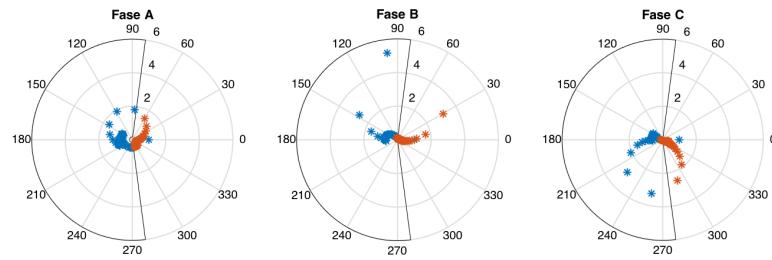


Figura 30: Criterio de activación de relé, en el plano complejo, en falla trifásica sólidamente aterrizada.

Para el caso de una falla trifásica, se observa una correcta activación de los tres relés durante el intervalo de duración de la falla entre 0.15ms y 0.2ms. Adicionalmente se muestra la manera en que, a diferencia de las fallas anteriores, las tres fases salen de la región normal de operación en su respectivo plano alfa.

Caso de Estudio

Adicionalmente, se prueba el relé a un archivo **COMTRADE** externo desconocido para simular un escenario real en el que se desconoce completamente lo ocurrido y se debe determinar si existe una falla, su duración, su tipo y la correcta activación del relé. Inicialmente, se obtienen los datos provenientes del **COMTRADE** y se aplica el módulo de procesamiento digital de señales para poder observar las señales de corriente de cada fase y su respectiva magnitud y fase, necesarias para aplicar la lógica del relé. Estos resultados se muestran en las figuras 31 a 33.

Las magnitudes de las corrientes en los terminales de las tres fases permanecen constantes, exceptuando un cambio abrupto en la fase B entre 89ms y 137ms aproximadamente. Este cambio abrupto exclusivo de esta fase, permite determinar que el evento ocurrido es una falla monofásica de la fase B a tierra con una duración de 48ms. Analizando esta misma fase, también se observa un cambio en el ángulo entre los dos terminales, los cuales iniciaron con una diferencia aproximada de 180° y se igualaron durante el tiempo de falla debido a que, en este momento, los generadores de cada terminal dejaron de actuar como transmisor y receptor de potencia respectivamente, y empezaron a transmitir en el mismo sentido de las mediciones, es decir hacia el centro de la línea donde ocurrió la falla.

Otro detalle no menor que puede observarse en las figuras 31 a 33 corresponde al retardo generado por el procesamiento de la señal debido a que se necesita un ciclo de la onda para aplicar la transformada de Fourier. Por este motivo, los flancos de subida y bajada de las señales de magnitud, así como las alteraciones en la fase ocurren unos milisegundos después de la ocurrencia y posterior solución de la falla respectivamente. Adicionalmente, se observa una gran diferencia entre las magnitudes de corriente entre los dos terminales para cada una de las fases, lo cual refleja un alto consumo de potencia en la línea, generado posiblemente por un modelo de línea con alta impedancia.

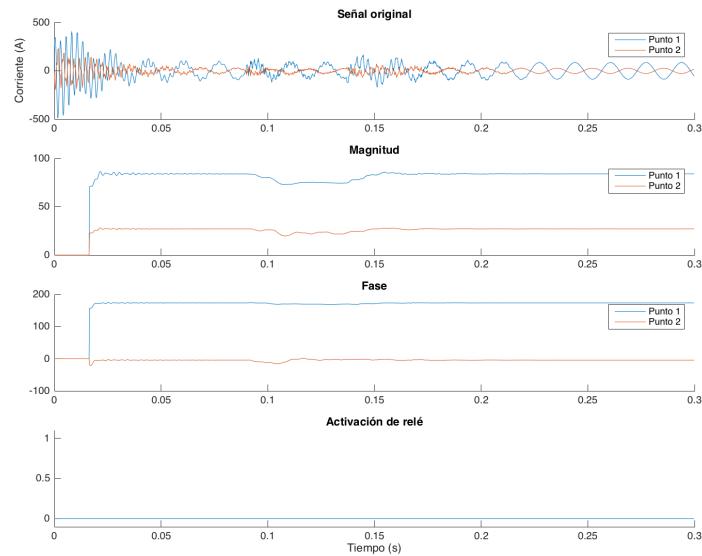


Figura 31: Resultados caso de estudio para la fase A.

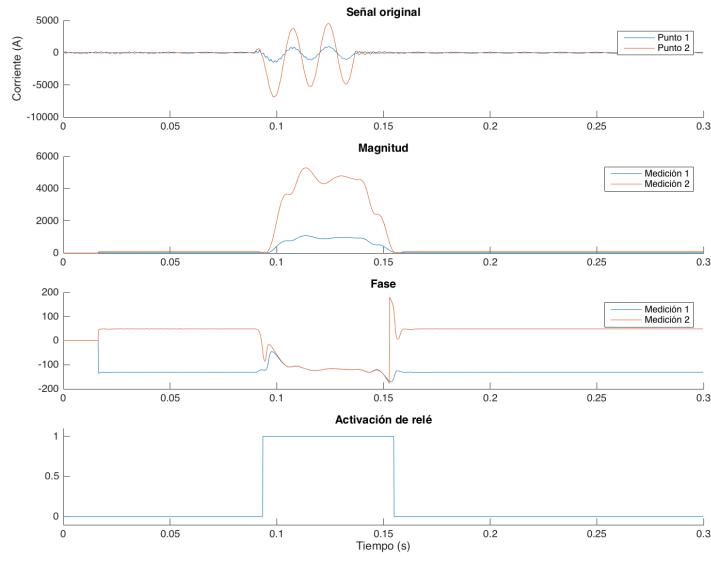


Figura 32: Resultados caso de estudio para la fase B.

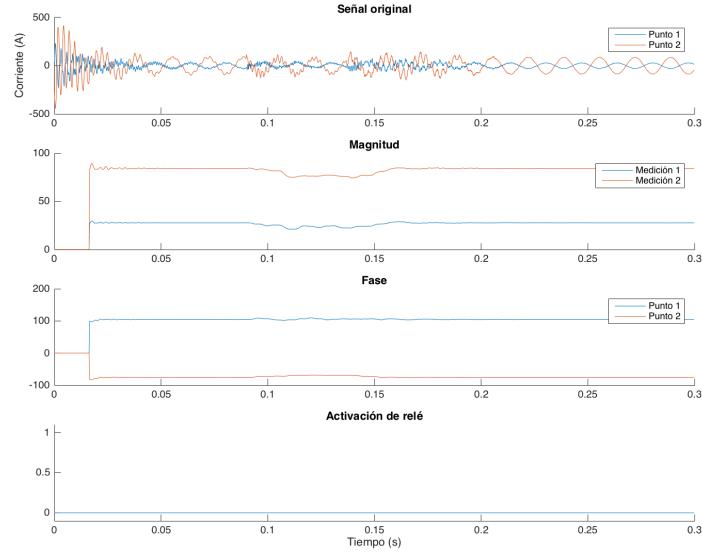


Figura 33: Resultados caso de estudio para la fase C.

Finalmente, las figuras 34 y 35 muestran el resumen de la activación de los relés y la evolución de la relación entre las corrientes de los terminales en el plano complejo para cada una de las fases. En los diagramas polares, se puede observar que la única fase que sale de la región restringida de operación es la fase B, confirmando que es una falla monofásica de esta fase. Por este motivo, se puede apreciar

claramente que el único relé que se activa corresponde al de la fase mencionada, durante el intervalo de tiempo en que se presenta la falla, adicionando los retardos de procesamiento.

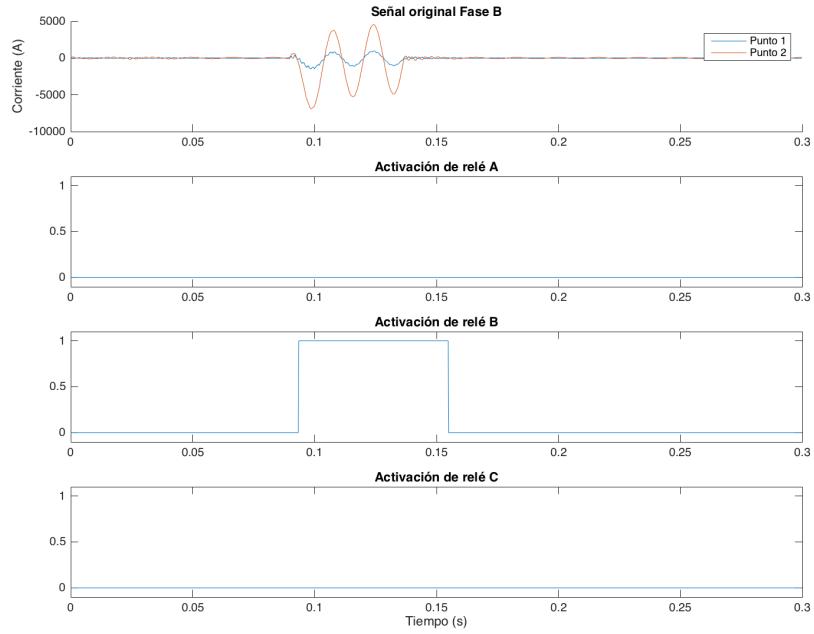


Figura 34: Resumen resultados caso de estudio.

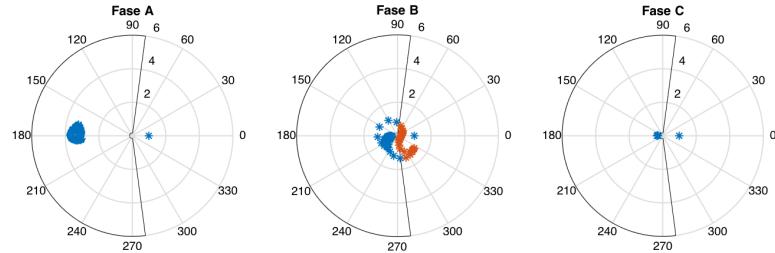


Figura 35: Diagramas fasoriales caso de estudio.

Medición mediante transformadores de corriente y voltaje

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones al realizar mediciones usando transformadores de voltajes y corrientes. Todas las simulaciones activan el relé con un delay de 2 milisegundos.

Falla en la linea A sólidamente aterrizada Interna

La primera falla es una falla interna en la línea A sólidamente aterrizada. Las figuras 36 y 37 muestran los resultados de activación de los relés, así como los diagramas fasoriales correspondientes a las 3 fases.

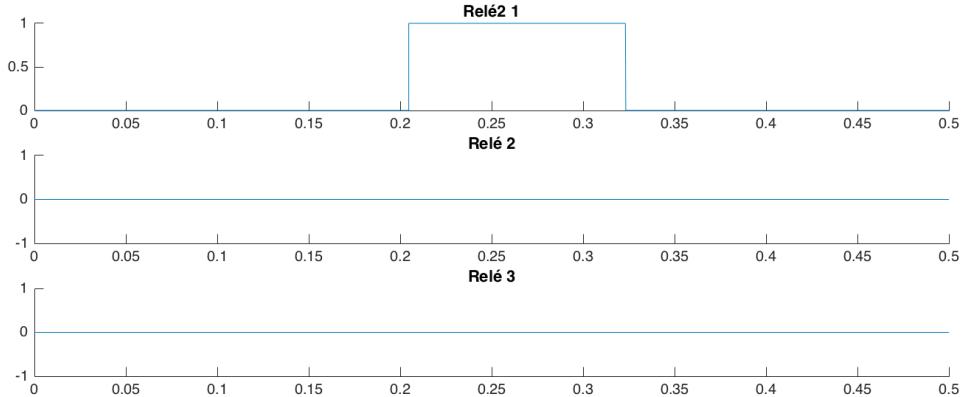


Figura 36: Resumen falla monofásica interna.

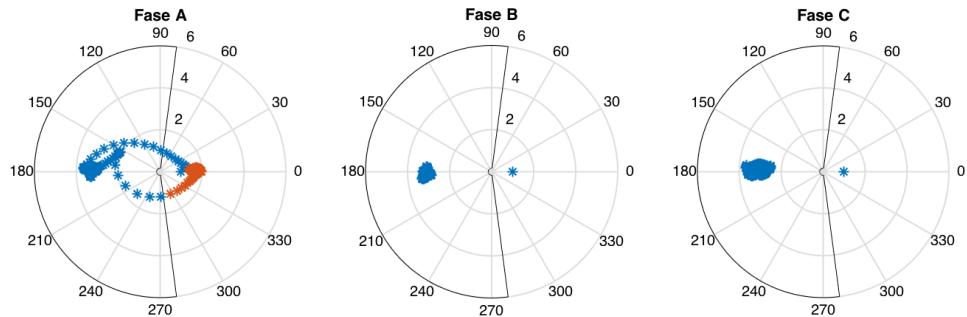


Figura 37: Diagramas fasoriales falla monofásica interna.

Se observan movimientos en el fasor de la fase fallada (A) hasta entrar en la región de falla. Se activa el relé 2 milisegundos después debido al delay. Ninguna de las otras dos fases muestra movimientos, ni activación de relé.

Falla trifásica sólidamente aterrizada Interna

Siguiendo, se muestran los resultados de realizar una falla trifásica sólidamente aterrizada interna. Los resultados de las activaciones de relé se muestran en la figura 38 mientras que los diagramas fasoriales se muestran en la figura 39

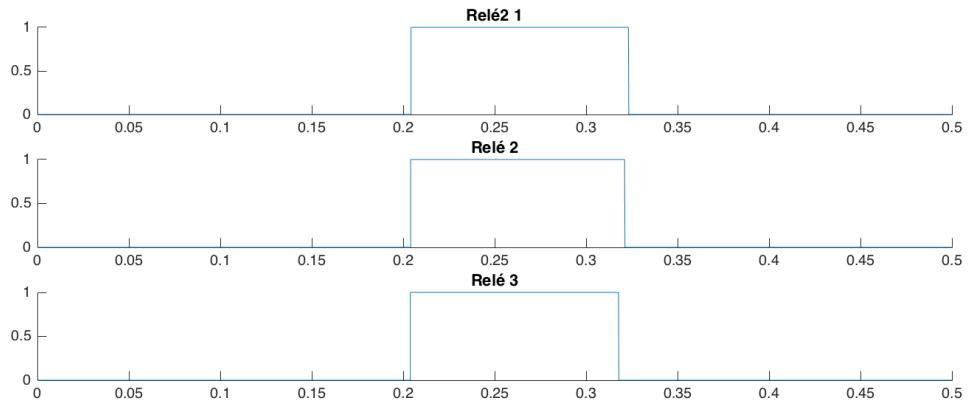


Figura 38: Resumen falla trifásica interna.

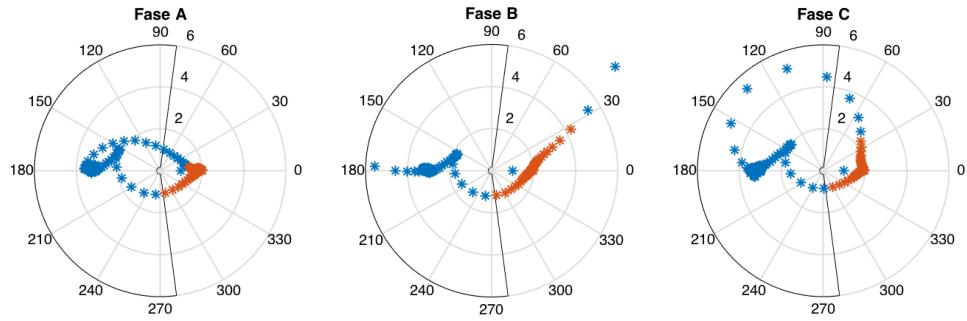


Figura 39: Diagramas fasoriales falla trifásica interna.

Se observan activación en los tres relés en el momento de la falla. Las tres fases muestran un comportamiento correcto, al entrar en región de falla y disparar el relé 2 milisegundos después de entrar en esta.

Falla trifásica sólidamente aterrizada Externa.

Adicionalmente, también se probó el correcto funcionamiento del relé ante fallas externas. En estos casos, los relés deben evitar ser activados por fallas que ocurren en líneas diferentes a la línea protegida entre los buses 1 y 2. En este caso, se simula una falla trifásica sólidamente aterrizada al 33 % de la línea paralela a la que se está protegiendo. Las figuras 40 y ?? muestran las señales de activación de cada relé y el recorrido de la relación entre las mediciones de corriente desde los CTs ubicados en cada uno de los terminales. Como se puede apreciar, esta relación siempre se mantiene en la zona de operación normal de la línea, por lo cual se reconoce que la falla es externa a la línea protegida y por

ende no se activa el relé de ninguna fase.

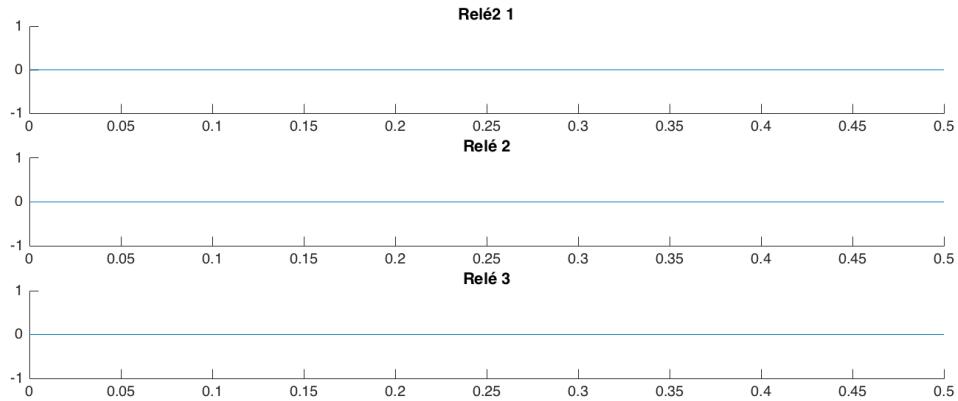


Figura 40: Resumen falla trifásica Externa.

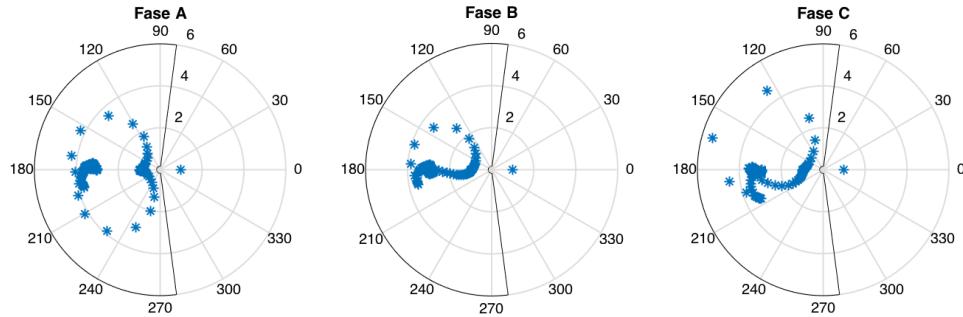


Figura 41: Diagramas fasoriales falla trifásica Externa.

Falla Línea a Línea Externa

Las figuras 42 y 43 muestran los resultados obtenidos al simular una falla línea a línea externa aterrizada a través de una impedancia de 100Ω al 66 % de la línea entre el bus 2 y el bus 4. En ella se puede observar que a pesar existir una falla en el sistema, al estar por fuera de la zona de protección, es decir, al ser en una línea distinta a la que se está protegiendo, el relé no se activa. El detalle de las corrientes correspondientes a cada una de las fases se muestra en anexos.

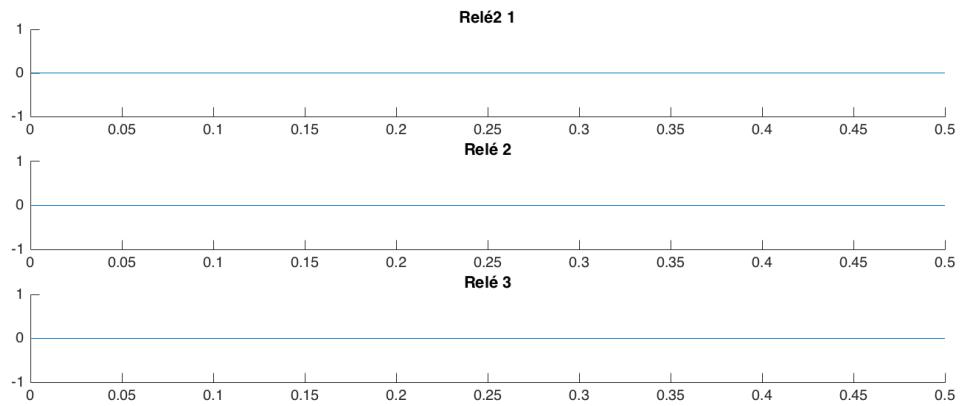


Figura 42: Resumen falla linea linea externa.

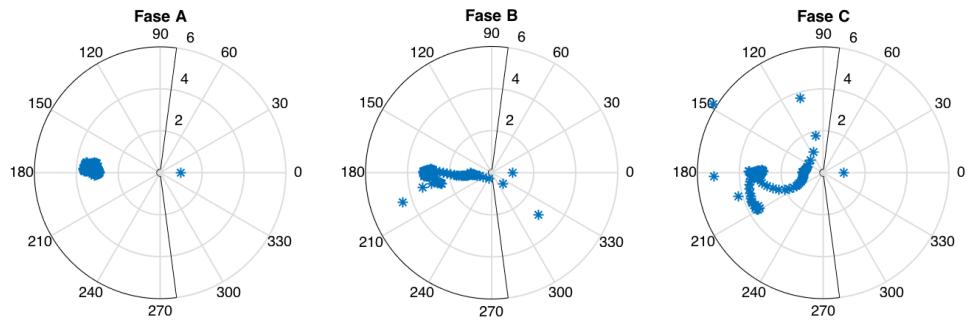


Figura 43: Diagramas fasoriales falla linea linea externa.

Análisis de operación del Delay

Para verificar el correcto funcionamiento del *delay* introducido a la activación del relé, se realiza una prueba usando un *delay* de 2 milisegundos y una prueba usando un *delay* de 0 milisegundos. Se muestran en las figuras 44 y 45 estos resultados. Únicamente se hace esta comprobación con la falla interna monofásica.

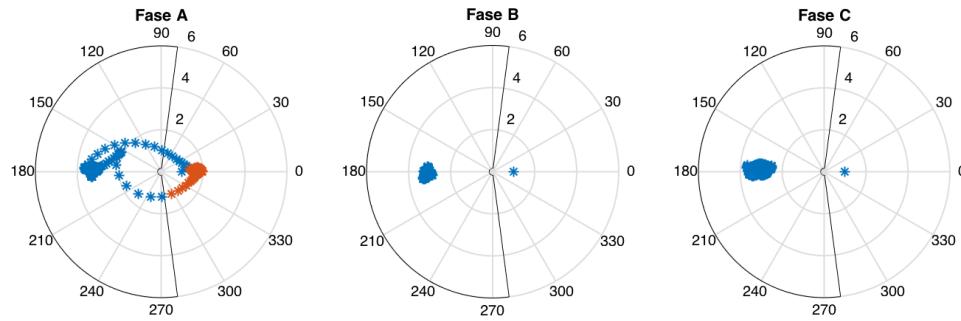


Figura 44: Diagramas fasoriales de falla monofásica interna con un delay de 2 milisegundos.

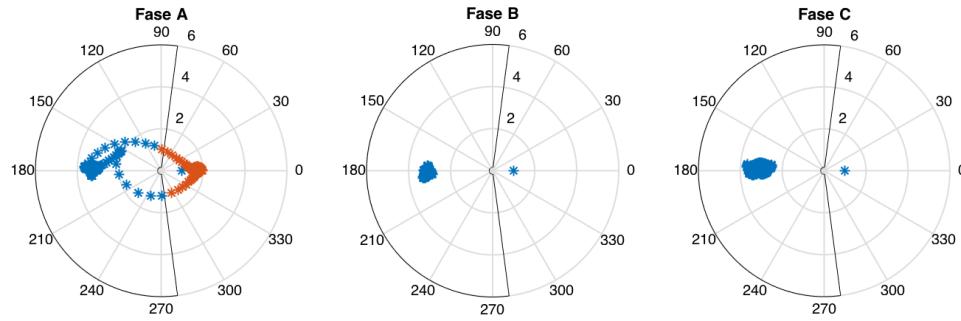


Figura 45: Diagramas fasoriales falla monofásica interna sin delay.

Al comparar las figuras 44 y 45 en la fase A, se observa que para el caso sin delay, justo en el instante en el cual el fasor entra en la región de falla, se dispara el relé. Por el contrario, cuando se aplica un delay de 2 milisegundos, el fasor entra en la región de falla, pero no se activa el relé hasta unos instantes después. Para ambos casos, el relé se desactiva instantáneamente al salir de la región de falla.

Referencias

- [1] D. Carroll, J. Dorfner, T. Lee, K. Fodero, C. Huntley. Resolving Digital Line Current Differential Relay Security and Dependability Problems: A Case History, Line Current Differential Protection: A Collection of Technical Papers Representing Modern Solutions, 2014.

- [2] J. Burger, H. Miller, N. Fisher, B. Kasztenny. Modern Line Current Differential Protection Solutions, Line Current Differential Protection: A Collection of Technical Papers Representing Modern Solutions, 2014.
- [3] B. Kirby, 2007, Disponible en: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15619-comtrade-reader?focused=5092432&tab=function>
- [4] IEEE C37.111-2013 IEEE/IEC Measuring relays and protection equipment – Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems

ANEXOS

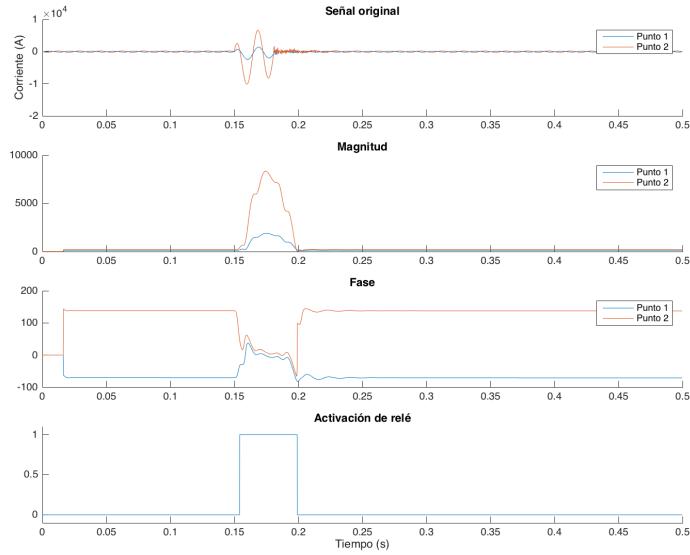


Figura 46: Fase A falla monofásica.

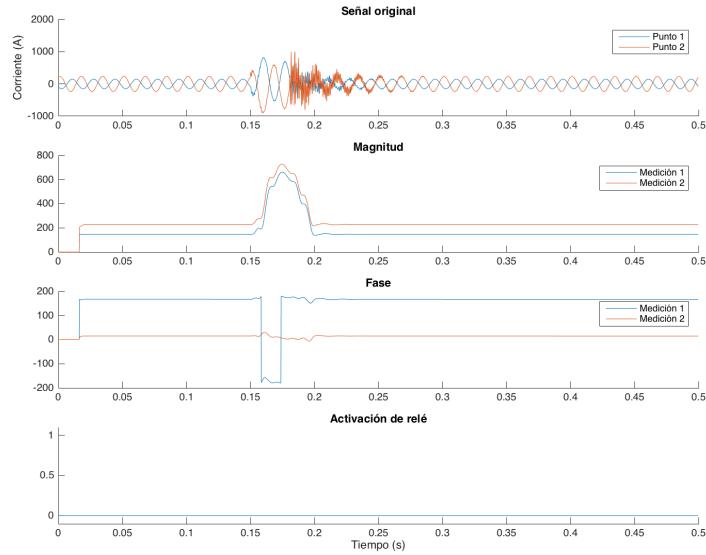


Figura 47: Fase B falla monofásica.

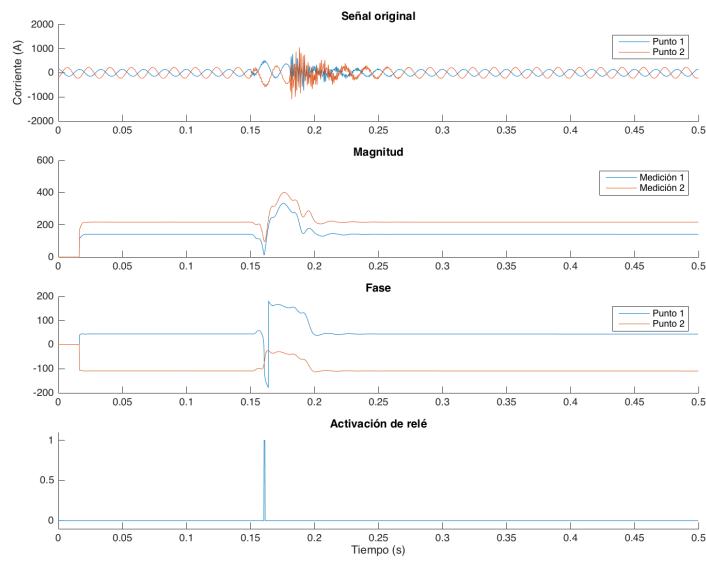


Figura 48: Fase C falla monofásica.

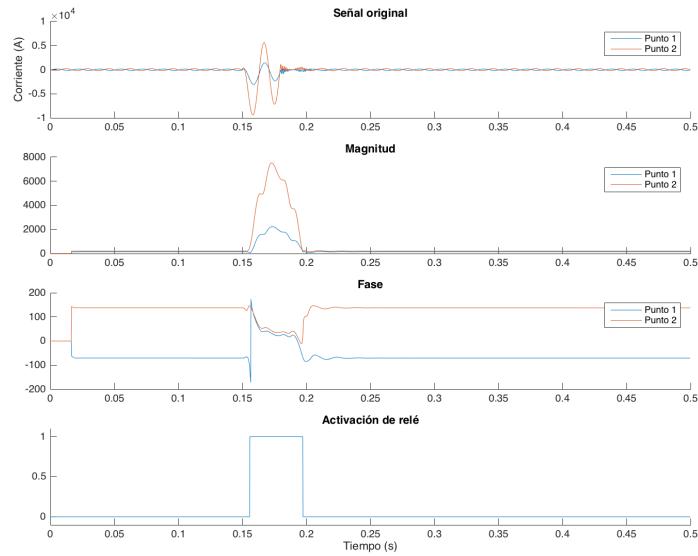


Figura 49: Fase A falla linea interna.

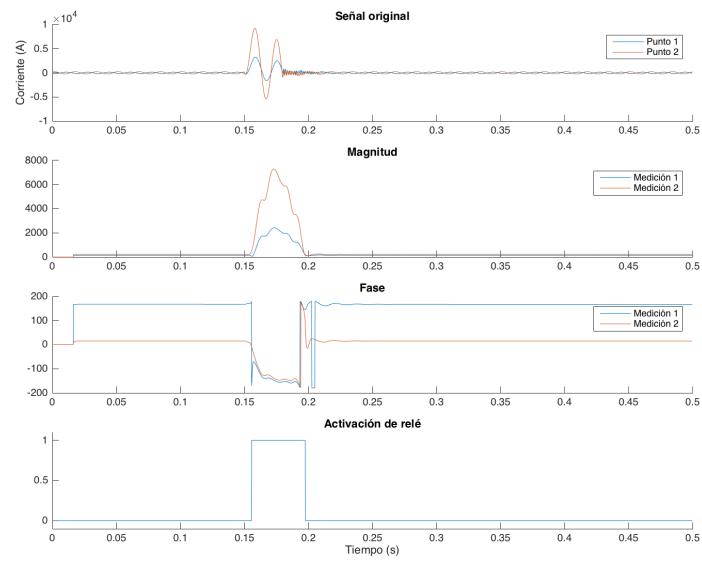


Figura 50: Fase B falla linea linea interna.

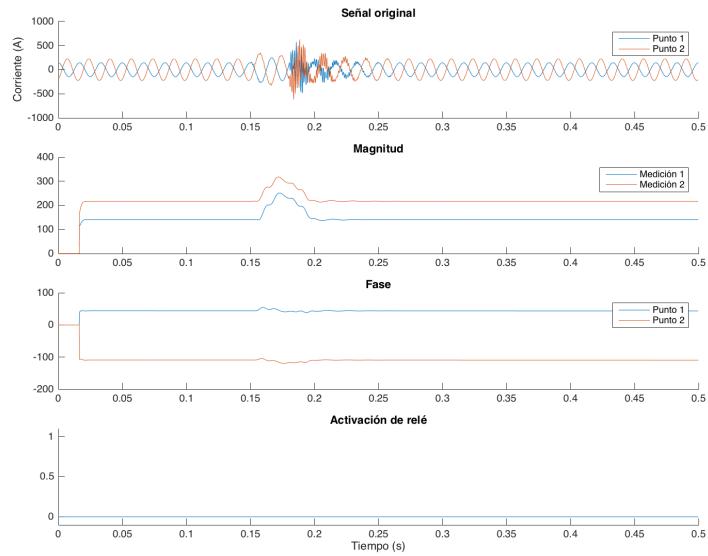


Figura 51: Fase C falla linea linea interna.

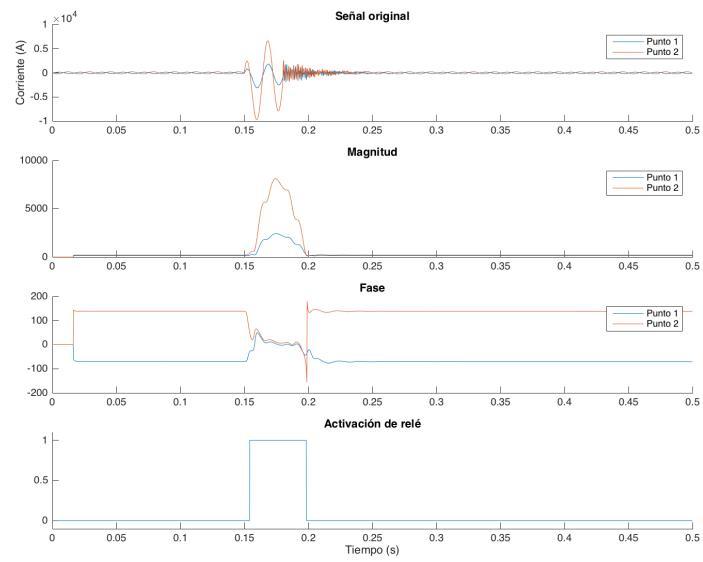


Figura 52: Fase A trifásica interna sin CT.

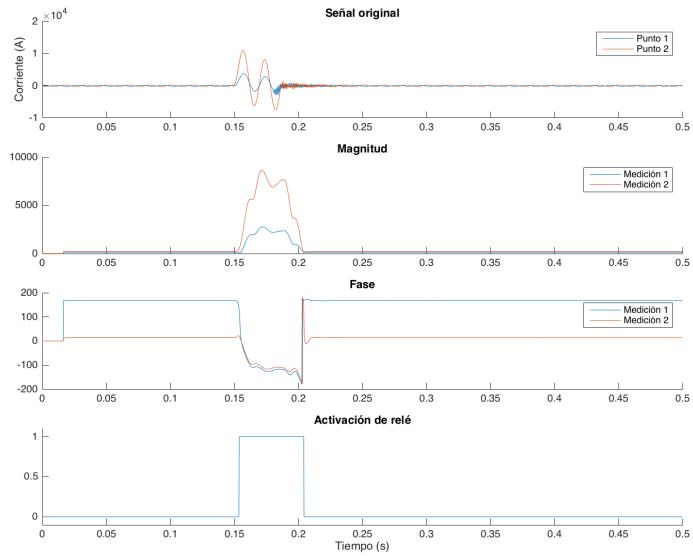


Figura 53: Fase B trifásica interna sin CT.

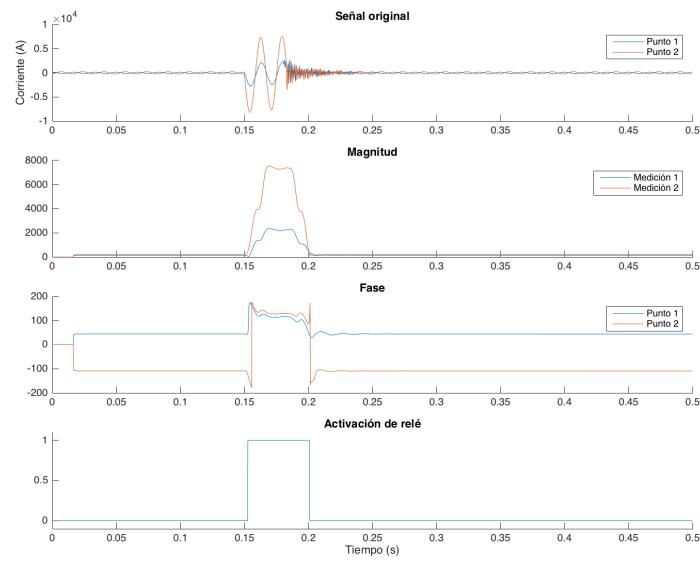


Figura 54: Fase C trifásica interna sin CT.

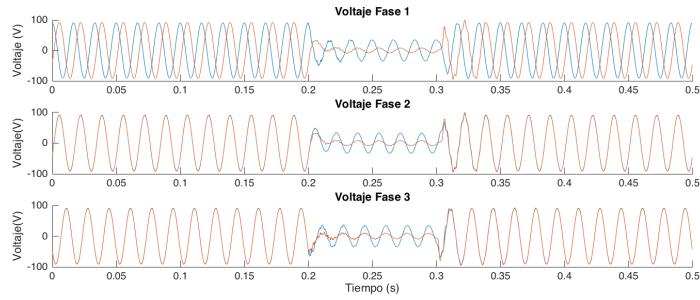


Figura 55: Voltajes falla trifásica interna.

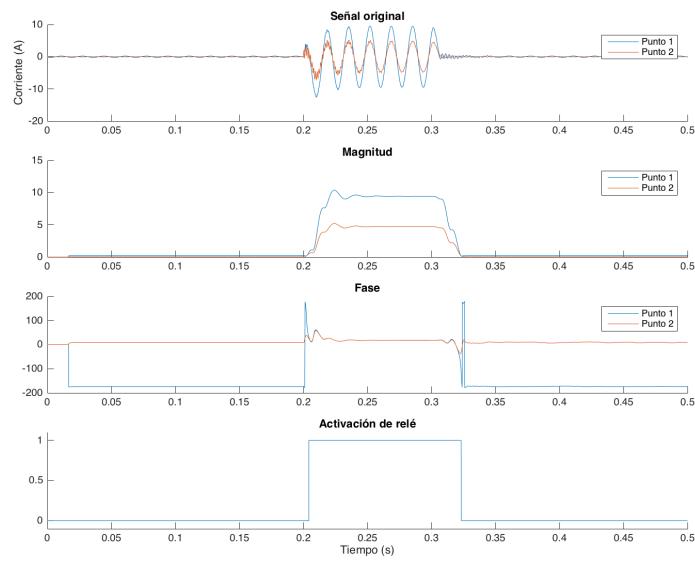


Figura 56: Fase 1 trifásica interna.

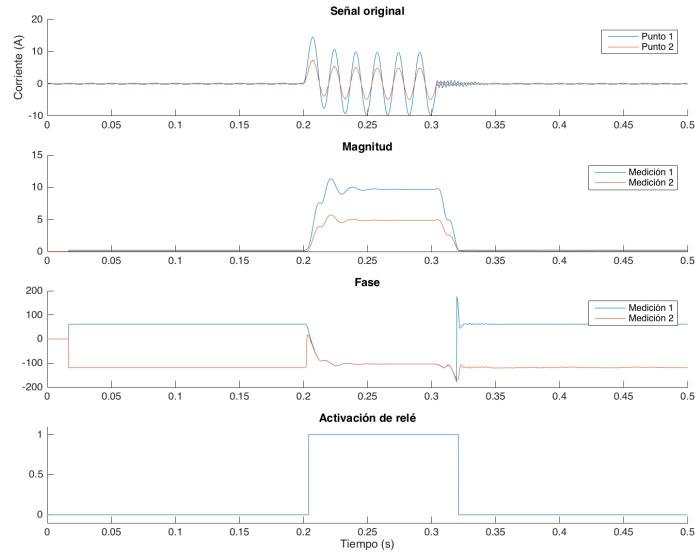


Figura 57: Fase 2 trifásica interna.

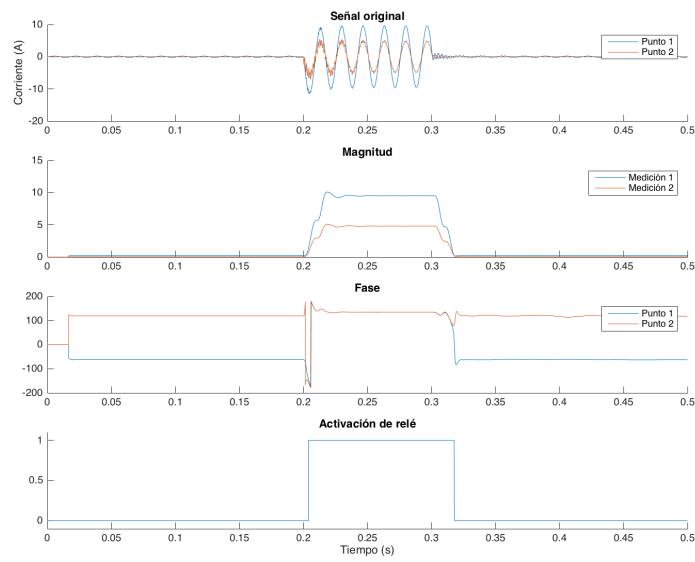


Figura 58: Fase 3 trifásica interna.

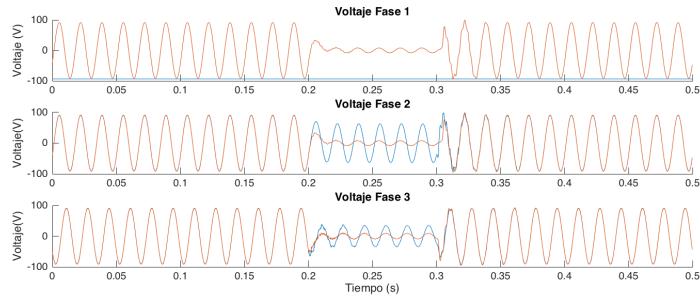


Figura 59: Voltajes falla trifásica externa.

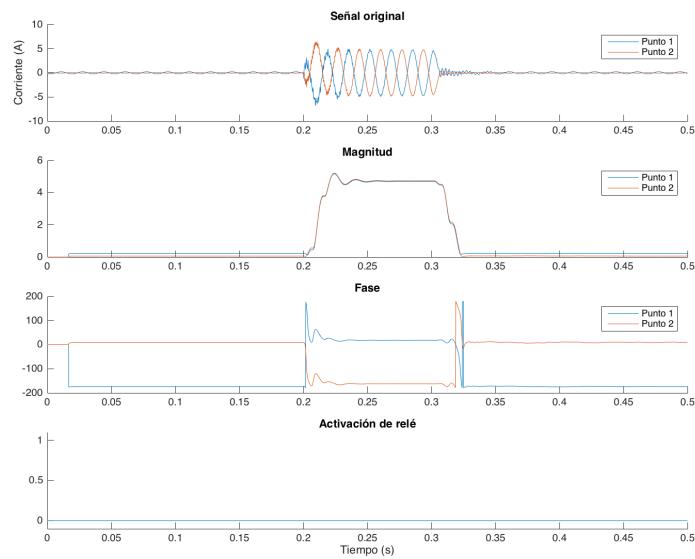


Figura 60: Fase 1 trifásica externa.

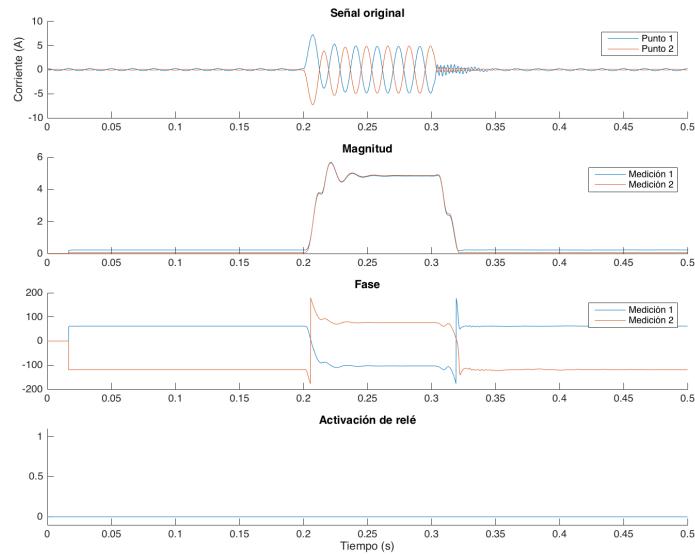


Figura 61: Fase 2 trifásica externa.

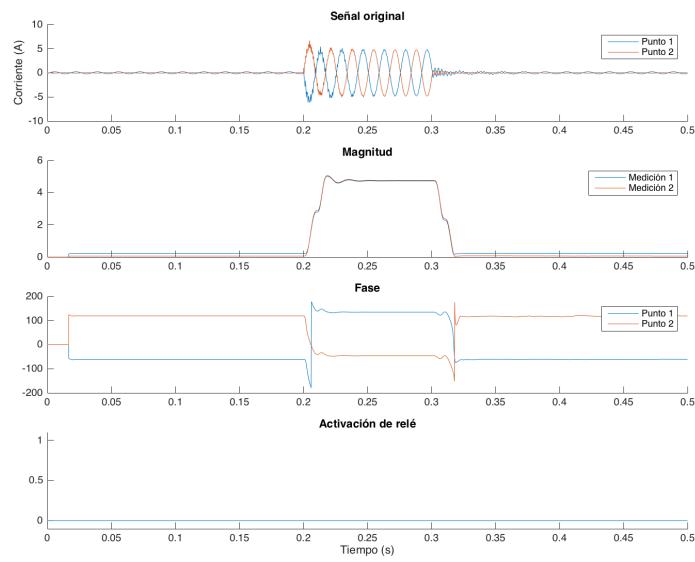


Figura 62: Fase 3 trifásica externa.

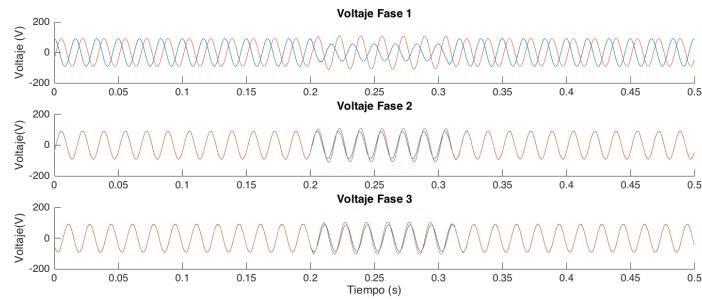


Figura 63: Voltajes falla monofásica interna.

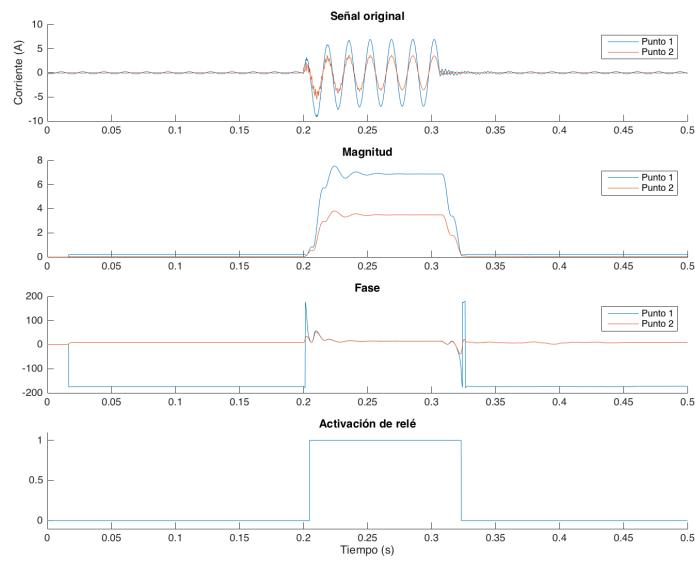


Figura 64: Fase 1 monofásica interna.

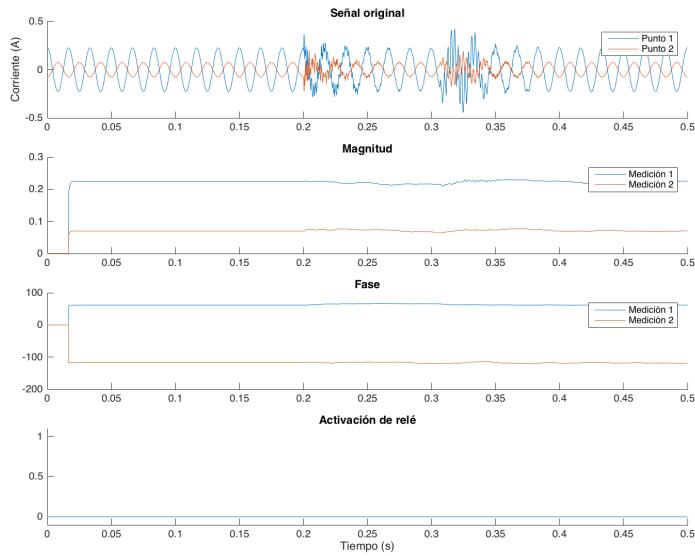


Figura 65: Fase 2 monofásica interna.

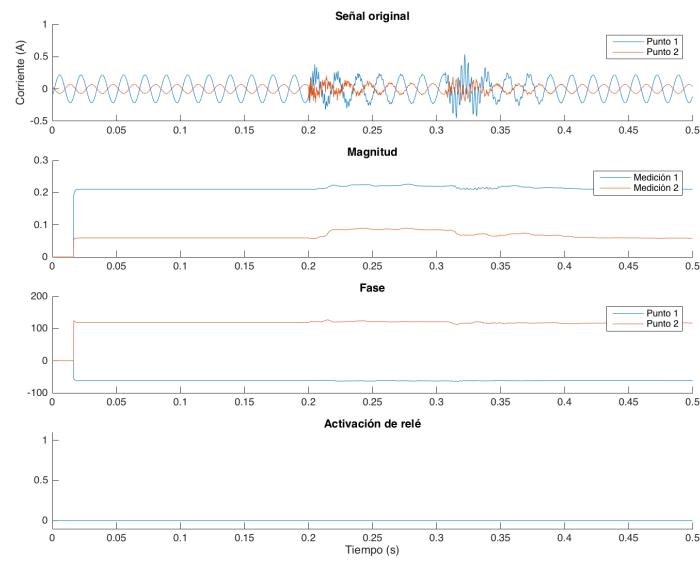


Figura 66: Fase 3 monofásica interna.

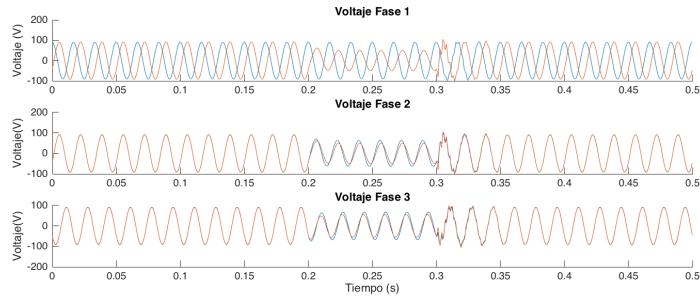


Figura 67: Voltajes falla Línea-Línea Externa.

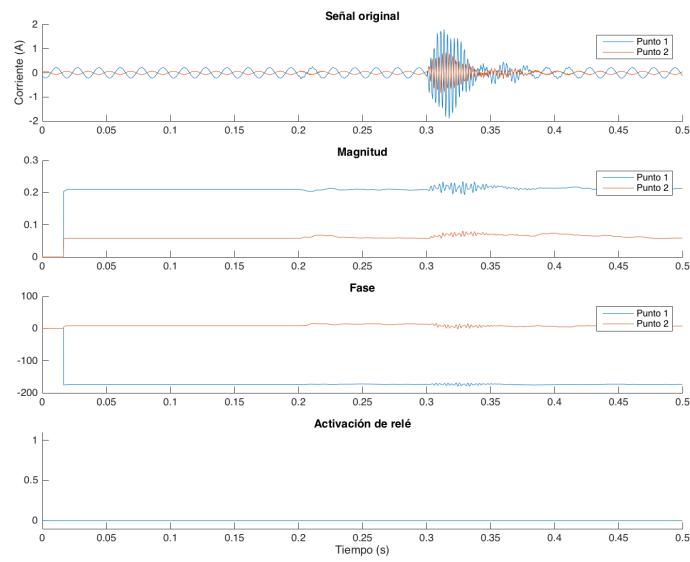


Figura 68: Fase 1 linea linea externa.

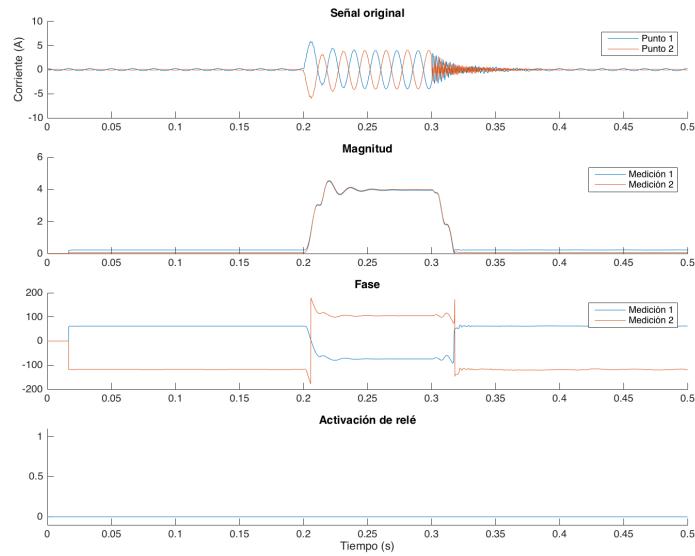


Figura 69: Fase 2 linea linea externa.

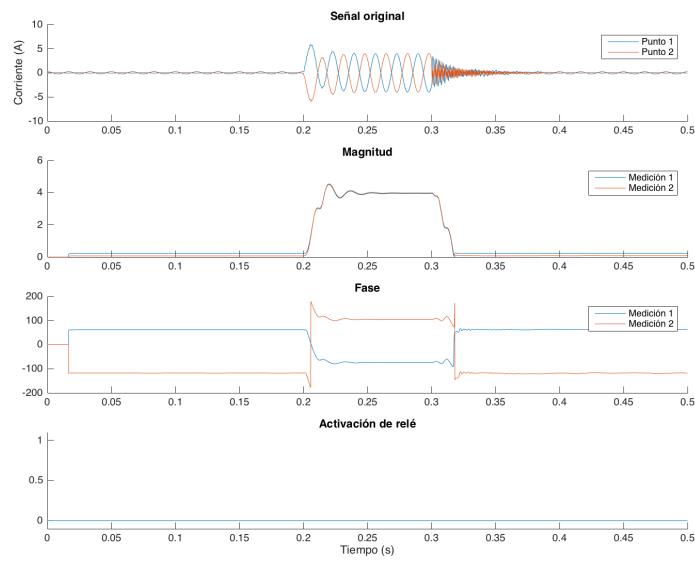


Figura 70: Fase 2 linea linea externa.